

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentori
Srećko Švaić
Damir Dović

Tomislav Jolić

Zagreb, 2009

Sažetak

U praksi su česte uredske zgrade koje imaju ugrađen neki sustav grijanja ali nemaju sustav za dobavu svježeg zraka te se provjetravanje obavlja otvaranjem prozora i vrata. To dovodi do velikih toplinskih gubitaka, odnosno povećava se potrošnja toplinske energije.

Zbog toga je u ovom diplomskom radu provedena analiza i prikazana konstrukcija rekuperator topline od ekstrudiranih aluminijskih profila sa svrhom povrata topline iz otpadnog zraka u svježi zrak za prozračivanje grijanih uredskih prostorija, odnosno radi uštede na toplinskoj energiji.

Prvo je provedena analiza termodinamičkih svojstava izmjenjivača, pri vanjskoj temperaturi $\theta_1' = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, za različite oblike presjeka strujanja da bi se došlo do optimalne konstrukcije.

Potom je analizirano što se dešava pri promjeni vanjske temperature, a što smanjenjem protoka struje svježeg zraka.

Proveden je i proračun pada tlaka s ciljem dimenzioniranja ventilatora.

Na kraju je napravljena analiza uštede toplinske energije i potrošnje električne energije na ventilatoru, te potrebne energije za dogrijavanje svježeg zraka na sobnu temperaturu. Ta je analiza provedena za srednje mjesečne temperature.

Sadržaj

1.	UVOD	1
1.1	Regenerativni sustavi povrata topline	2
1.1.1	Rotirajući regeneratori	3
1.1.2	Regeneratori s akumulirajućim pločama	4
1.2	Rekuperativni sustavi povrata topline	4
1.2.1	Pločasti izmjenjivači	5
1.2.2	Toplinske cijevi	7
1.2.3	Kružni cirkulacijski sustavi	8
2.	TEHNIČKI OPIS IZMJENJIVAČA	9
3.	TOPLINSKI PRORAČUN	11
3.1	Izračun koeficijenta konvektivnog prijelaza topline i temperatura zraka na izlazu iz izmjenjivača	11
3.1.1	Analiza 1	14
3.1.2	Analiza 2	20
3.1.3	Analiza 3	26
3.1.4	Analiza 4	30
3.2	Određivanje temperature stjenke	36
3.3	Analiza promjene temperature ubacivanja smanjenjem količine svježeg zraka	38
3.4	Analiza promjene učina s promjenom protoka zraka	39
4.	PRORAČUN PADA TLAKA	42
5.	Ušteda energije i potrošnja dodatne energije za dogrijavanje i ventilator	46
6.	ZAKLJUČAK	48

Popis slika

Slika 1. Shema regeneratora topline	2
Slika 2. Rotirajući regenerator	3
Slika 3. Primjer pločastog izmjenjivača	5
Slika 4. Povećanje učinka ugradnjom dva uzastopna izmjenjivača.....	6
Slika 5. Kompaktni pločasti izmjenjivač kapljevina/kapljevina	6
Slika 6. Toplinske cijevi	7
Slika 7. Kružni cirkulacijski sustav povrata topline	8
Slika 8. 3D model izmjenjivača	9
Slika 9. θ, A - dijagram istosmjernog izmjenjivača topline.....	13
Slika 10. Osnovni element presjeka strujanja	14
Slika 11. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500$ m^3/h i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	17
Slika 12. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500$ m^3/h i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	17
Slika 13. Promjena površine izmjene topline s promjenom brzine strujanja uz protoke zraka $q_v=500m^3/h$ i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	18
Slika 14. Ovisnost temperature ubacivanja svježeg zraka u prostoriju (θ_1'') i temperature izbacivanja otpadnog zraka (θ_2'') o brzini strujanja pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	19
Slika 15. Ovisnost toplinskog toka Q o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500m^3/h$ i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	19
Slika 16. Osnovni element presjeka strujanja	20
Slika 17. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500$ m^3/h i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	22
Slika 18. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500$ m^3/h i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	23
Slika 19. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500$ m^3/h i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	24
Slika 20. Ovisnost toplinskog toka Q o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500m^3/h$ i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1'=-15^\circ C$	24
Slika 21. Poprečni presjek izmjenjivača.....	25

Slika 22. Ovisnost temperature ubacivanja o vanjskoj temperaturi za odabrani presjek	25
Slika 23. Osnovni element presjeka strujanja	26
Slika 24. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	27
Slika 25. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	28
Slika 26. Ovisnost temperature ubacivanja svježeg zraka u prostoriju (ϑ_1'') i temperature izbacivanja otpadnog zraka (ϑ_2'') o brzini strujanja pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	29
Slika 27. Ovisnost toplinskog toka Q o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	29
Slika 28. Poprečni presjek izmjenjivača	30
Slika 29. Osnovni element presjeka strujanja	31
Slika 30. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	33
Slika 31. Ovisnost temperature ubacivanja svježeg zraka u prostoriju (ϑ_1'') i temperature izbacivanja otpadnog zraka (ϑ_2'') o brzini strujanja pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	34
Slika 32. Ovisnost toplinskog toka Q o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	34
Slika 33. Konačni poprečni presjek izmjenjivača	35
Slika 34. Ovisnost temperature ubacivanja o vanjskoj temperaturi za odabrani presjek pri protocima zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$	35
Slika 35. Temperatura stjenke po visini izmjenjivača pri protocima zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i uz vanjsku temperaturu $\vartheta_1''=-15^\circ\text{C}$	37
Slika 36. Ovisnost temperature ubacivanja o količini svježeg zraka pri konstantnoj količini otpadnog zraka	39
Slika 37. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o protoku zraka	40
Slika 38. Promjena efikasnosti izmjenjivača s promjenom protoka zraka	41
Slika 39. Promjena učina izmjenjivača usljed promjene protoka zraka pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ$	41
Slika 40. Odabrani ventilator	44
Slika 41. Karakteristika odabranog ventilatora	45

Slika 42. Ušteđena toplinska energija Q_u i toplinska energija potrebna za dogrijavanje svježeg zraka na sobnu temperaturu Q_d pri protoku zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ izračunata preko srednji mjesečni temperatura 46

Popis tablica

Tabela 1. Određivanje koeficijenta prolaza topline pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	16
Tabela 2. Određivanje temperatura na izlazu iz izmjenjivača pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	18
Tabela 3. Određivanje koeficijenta prolaza topline pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	22
Tabela 4. Određivanje temperatura na izlazu iz izmjenjivača pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	23
Tabela 5. Određivanje koeficijenta prolaza topline uz protoke zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	27
Tabela 6. Određivanje toplinskog toka uz protoke zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	28
Tabela 7. Određivanje koeficijenta prolaza topline pri protok zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$	32
Tabela 8. Određivanje toplinskog toka uz protoke zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	33
Tabela 9. Određivanje temperature stjenke pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i uz vanjsku temperaturu $\vartheta_1''=-15^\circ\text{C}$	36
Tabela 10. Određivanje promjene temperature ubacivanja s promjeni količine svježeg zraka, pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$	38
Tabela 11. Izračun koeficijenta prijelaza topline i koeficijenta prolaza topline.....	39
Tabela 12. Određivanje učina izmjenjivača pri različitim protocima zraka	40
Tabela 13. Toplina vraćena iz otpadnog zraka i toplina potrebna za dogrijavanje svježeg zraka na sobnu temperaturu	46

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
A	m	- Površina izmjene topline
ACH	h^{-1}	- Broj izmjena zraka
a	m	- Širina izmjenjivača
α	m^2/s	- Koeficijent temperaturne vodljivosti
b	m	- Dužina izmjenjivača
c	m	- Dužina kanala
C	$/$	- Omjer toplinskih kapaciteta struja
C_1	W/K	- Toplinski kapaciteti struje svježeg zraka
C_2	W/K	- Toplinski kapaciteti struje otpadnog zraka
c_p	$J/(kgK)$	- Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku
d_e	m	- Ekvivalentni promjer strujanja
f	$/$	- Trajanje pogona dnevno
h'_1	J/kg	- Entalpija vanjskog zraka
h''_1	J/kg	- Entalpija svježeg zraka na izlazu iz izmjenjivača
h'_2	J/kg	- Entalpija zraka u prostoriji
k	W/m^2K	- Koeficijent prolaza topline
L	m	- Visina izmjenjivača
m	$/$	- Broj dana u mjesecu kada je rekuperator u pogonu
n	$/$	- Broj kanala
Nu	$/$	- Nusseltova značajka
NTU	$/$	- Bezdimenzijska veličina izmjenjivača
P	W	- Snaga ventilatora
P_T	kn/kWh	- Jedinična cijena toplinske energije
P_E	kn/kWh	- Jedinična cijena električne energije
\dot{Q}	W	- Toplinski tok izračunat preko razlike

		temperatura pojedine struje na ulazu i izlazu iz izmjenjivača
\dot{Q}_m	W	- Toplinski tok izračunat preko srednje logaritamske razlike temperatura
Q_d	J	- Toplinska energija za dogrijavanje zraka na sobnu temperaturu
Q_u	J	- Ušteđena toplinska energija
q_{m1}	kg/s	- Maseni protok struje svježeg zraka
q_{m2}	kg/s	- Maseni protok struje otpadnog zraka
q_v	m^3/s	- Volumni protok zraka
Pe	$/$	- Pecletova značajka
Re	$/$	- Reynoldsova značajka
V	m^3	- Volumen prostorije
w	m/s	- Brzina strujanja zraka
W_m	J	- Mjesečna potrošnja ventilator
W	J	- Električna energija potrošena za pogon ventilatora
α	W/m^2K	- Koeficijent prijelaza topline
α_L	W/m^2K	- Koeficijent prijelaza topline pri laminarnom strujanju
α_T	W/m^2K	- Koeficijent prijelaza topline pri turbulentnom strujanju
δ	m	- Debljina stjenke
δ	$^\circ$	- Kut
ε	$/$	- Efikasnost izmjenjivača
Δp	Pa	- Pad tlaka
$\Delta\vartheta_m$	$^\circ C$	- Srednja logaritamska razlika temperatura
ζ	$/$	- Koeficijent gubitaka
η	Ns/m^2	- Dinamička žilavost
ϑ_1'	$^\circ C$	- Vanjska temperatura
ϑ_1''	$^\circ C$	- Temperatura ubacivanja

ϑ_2'	°C	- Unutarnja temperatura
ϑ_2''	°C	- Temperatura izbacivanja
λ	W/mK	- Koeficijent toplinske vodljivosti
λ	/	- Koeficijent trenja
ν	m^2/s	- Kinematička žilavost
π_1, π_2, π_3	/	- Bezdimenzijske značajke izmjenjivača
ρ	kg/m^3	- Gustoća zraka
Φ	%	- Stupanj povrata topline
Φ_{h2}	%	- Stupanj povrata entalpije
Ψ	%	- Stupanj povrata vlage

Izjavljujem da sam rad radio samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima dr. sc. Srećku Švaiću i doc. Dr. sc. Damiru Doviću na pruženoj pomoći pri izradi.

1. UVOD

U današnje je vrijeme štednja energije jako važna bilo da to gledamo s ekonomskog ili s ekološkog stajališta. Naime potrošnja energije stalno raste, a s tim i njena cijena. S druge strane utjecaj efekta staklenika svakim je danom sve izraženiji te su ljudi sve više ekološki osviješteni. To je dovelo do toga da se zahtjeva znatno smanjenje emisija stakleničkih plinova. Zbog toga se sve više upotrebljavaju sustavi povrata topline.

Jedno od područja na kojem je najlakše ostvariti smanjenje emisije stakleničkih plinova, uz najmanje investicije, je zgradarstvo. Zbog toga su nove zgrade sve bolje toplinski izolirane i sve su manje propusne za zrak. U većim poslovnim zgradama uobičajeno imamo sustave klimatizacije s dobavom svježeg zraka. Ukoliko su protoci svježeg zraka veći od 2500 m³/h obvezno je korištenje sustava povrata topline. Ti sustavi služe za povrat toplinske energije iz otpadnog zraka koja bi se inače neiskorištena odbacila u okoliš.

Sustavi povrata topline se dijele na:

- Regenerativne
- Rekuperativne

Osnovna razlika između ovih dvaju sustava je u tome što rekuperativni sustavi vrše samo povrat osjetne topline, dok regenerativni sustavi mogu vršiti povrat i osjetne i latentne topline.

Osnovne karakteristike sustava povrata topline su:

- Stupanj povrata topline Φ
- Stupanj povrata vlage Ψ
- Pad tlaka Δp

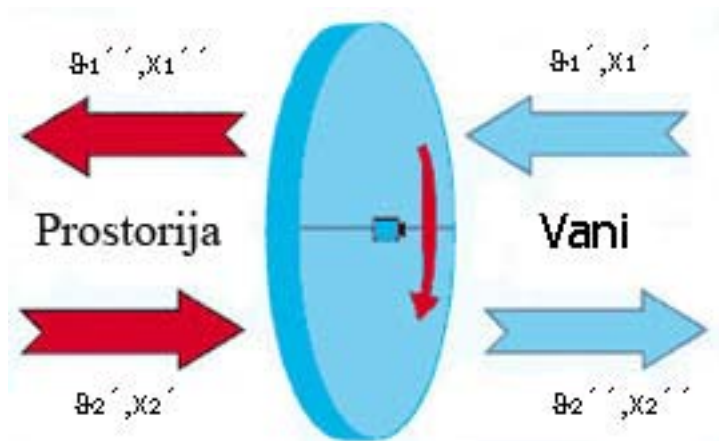
Stupanj povrata topline i stupanj povrata vlage izraženi na strani vanjskog zraka, uz uvjet da su jednaki protoci svježeg i otpadnog zraka, računaju se prema sljedećim izrazima:

Stupanj povrata topline

$$\Phi_2 = \frac{\vartheta_1'' - \vartheta_1'}{\vartheta_2' - \vartheta_1'}$$

Stupanj povrata vlage

$$\Psi_2 = \frac{x_1'' - x_1'}{x_2' - x_1'}$$



Slika 1. Shema regeneratora topline

Stupanj povrata topline i stupanj povrata vlage mogu se objediniti u stupnju povrata entalpije:

$$\Phi_{h2} = \frac{h_1'' - h_1'}{h_2' - h_1'}$$

1.1 Regenerativni sustavi povrata topline

U ovim sustavima prijenos topline vrši se preko akumulacijske mase što omogućuje povrat i osjetne i latentne topline. Pri tome dolazi do kontakta struja otpadnog i svježeg zraka te do djelomičnog miješanja tih dviju struja.

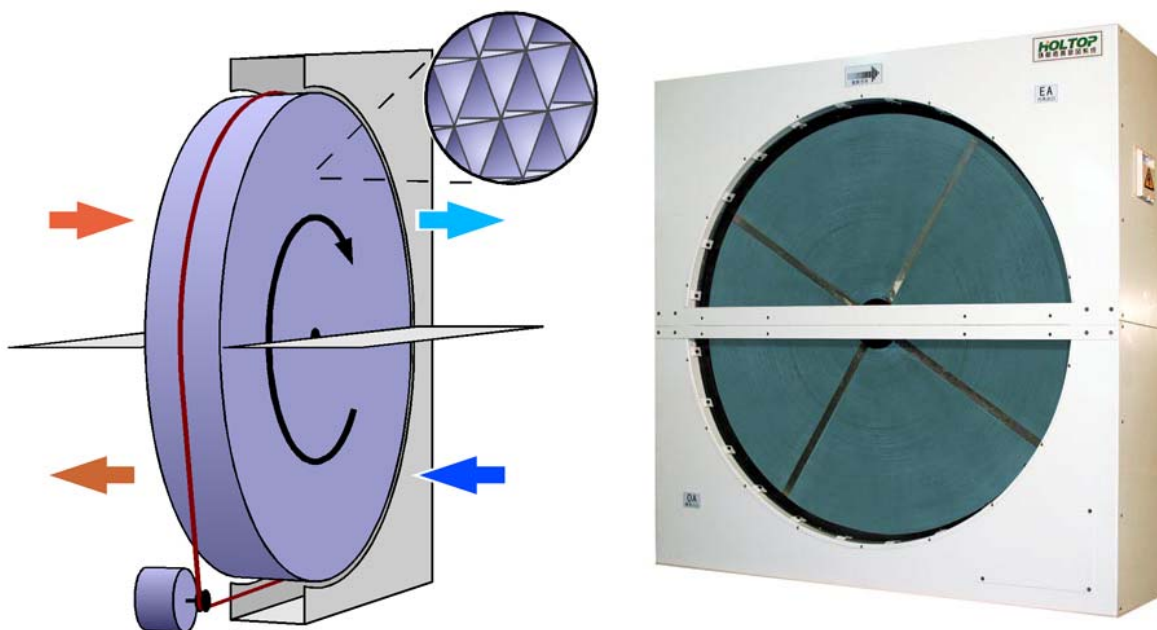
Prednosti ovih sustava su:

- Povrat topline i vlage
- Visok stupanj iskoristivosti
- Kompaktna izvedba

Nedostatci su:

- Djelomično miješanje struja
- Upotreblijivi su samo za plinove

1.1.1 Rotirajući regeneratori



Slika 2. Rotirajući regeneratori

Kod ovih regeneratora izmjena topline odvija se preko akumulacijske mase u obliku saća koja rotira na vertikalnoj osovini. Sa jedne strane struji topliji plin i predaje toplinu rotirajućoj masi koja ju akumulira, pri čemu se topliji plin hladi. S druge strane preko tako zagrijane akumulacijske mase struji hladniji fluid i preuzima od nje toplinu te se zagrijava. Stupanj povrata topline i stupanj povrata vlage kreću im se u granicama od 70 do 90%. Koriste se u temperaturnom području do 200 °C i za protoke plina do 150000 m³/h. Regulacija učinka vrši se promjenom broja okretaja.

Postoje dva osnovna tipa rotirajućih regeneratora:

- Sorpcijski
- Kondenzacijski

Kod sorpcijskih rotirajućih regeneratora saće je presvučeno higroskopnim materijalom koji na sebe preuzima vlagu s vlažne struje te ju predaje suhoj struji. Time dobivamo povrat osjetne i latentne topline zimi, a hlađenje i odvlaživanje ljeti.

Kondenzacijski regeneratori imaju glatke površine saća (najčešće aluminijske ili čelične) pa do povrata latentne topline dolazi samo u slučaju hlađenja ispod temperature rosišta što se događa jedino zimi.

1.1.2 Regeneratori s akumulirajućim pločama

Ovi regeneratori sastoje se od dva paketa akumulirajućih ploča i rade tako što sustav zaklopki usmjerava otpadni zrak preko jednog paketa ploča, te ga "puni" (grije ili hladi), dok svjež zrak istovremeno struji preko drugog paketa, koji je u prethodnom ciklusu bio "napunjen", te ga "prazni" (hladi ili grije). To traje određeno vrijeme, a onda se zaklopke prekrenu, čime počinje novi ciklus. Regulacija učinka vrši se promjenom vremena trajanja ciklusa.

Ovi se regeneratori upotrebljavaju za prijenos topline između plinova. Miješanje struje svježeg zraka i struje otpadnog zraka je do 2%. Stupnjevi povrata topline i povrata vlage iznose od 70 do 90%.

1.2 Rekuperativni sustavi povrata topline

Kod ovih sustava struje su međusobno razdvojene čvrstom stjenkom preko koje se vrši izmjena topline. Između dviju struja ne postoji direktni kontakt tako da nema miješanja dviju struja. Posljedica toga je mogućnost povrata samo osjetne topline.

Prednosti ovih sustava su:

- Razdvajanje medija
- Mogućnost rada s različitim medijima (voda, zrak...)

Nedostatci su:

- Niži stupanj iskoristivosti
- Veće dimenzije
- Veći pad tlaka

1.2.1 Pločasti izmjenjivači



Slika 3. Primjer pločastog izmjenjivača

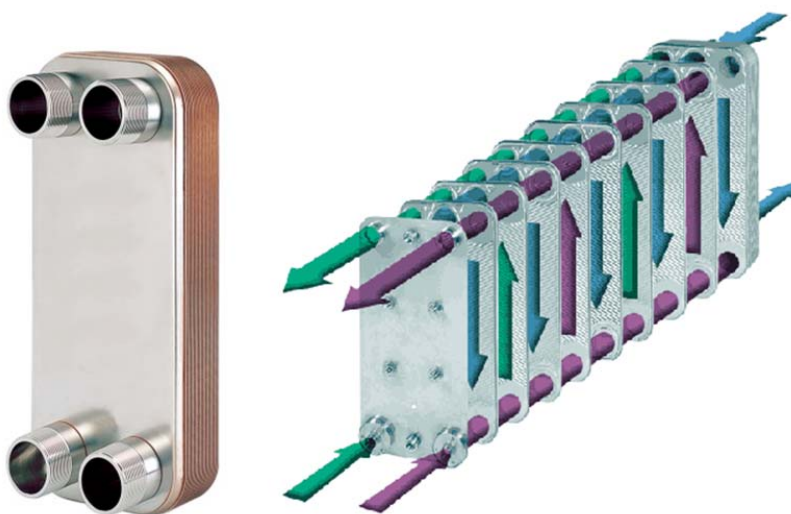
Na prethodnoj slici prikazan je jedan uobičajeni pločasti rekuperator. Strujanje medija u ovakvim rekuperatorima je križno. Stupanj povrata topline kreće se u granicama od 50 do 60%. Materijal ploča je aluminijski ili čelični lim debljine do 1 mm. Razmak između ploča je od 5 do 10 mm.

Povećanje stupnja povrata topline može se ostvariti ugradnjom dvaju izmjenjivača jednog iza drugog kako je to prikazano na sljedećoj slici.



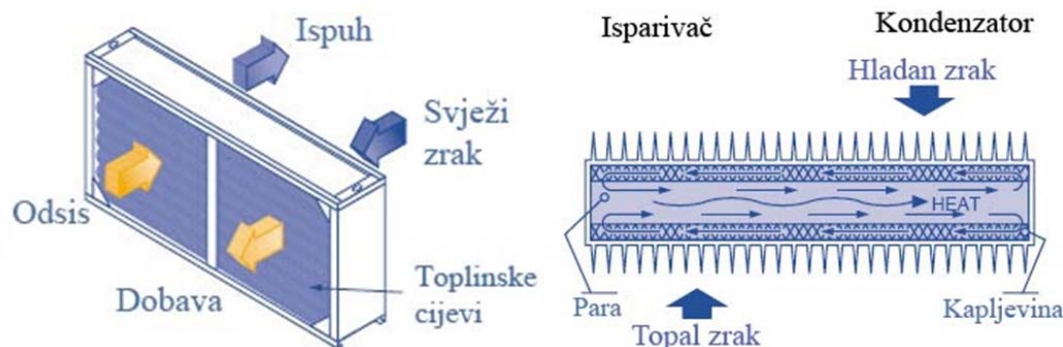
Slika 4. Povećanje učinka ugradnjom dva uzastopna izmjenjivača

Ukoliko se povrat topline vrši između kapljevine i kapljevine onda se koriste kompaktni pločasti izmjenjivači.



Slika 5. Kompaktni pločasti izmjenjivač kapljevina/kapljevina

1.2.2 Toplinske cijevi



Slika 6. Toplinske cijevi

Dvije su osnovne izvedbe toplinskih cijevi:

- Vodoravna izvedba
- Uspravna izvedba

Na prethodnoj slici prikazana je vodoravna izvedba. Izmjenjivač je sastavljen od vodoravnih orebrenih cijevi koje su na unutrašnjoj površini presvučene poroznim slojem. U njima se nalazi radna tvar koja kondenzacijom u jednom djelu izmjenjivača predaje toplinu hladnijoj struji plina (svježi zrak), dok u drugom djelu izmjenjivača isparava i uzima toplinu od toplije struje plina (otpadni zrak). Kondenzat uslijed kapilarnih sila struji poroznim slojem iz zone kondenzacije u zonu isparavanja.

Regulacija učinka može se mijenjati promjenom nagiba cijevi.

Kod uspravne izvedbe radna tvar u cijevima kondenzira u gornjem djelu, te se kondenzat gravitacijskim putem slijeva i isparava u donjem dijelu cijevi. To znači da preko gornjeg dijela mora strujati hladnija struja koja se grije, a na donjem dijelu toplija koja se hladi.

Stupanj povrata topline u ovim sustavima kreće se od 50 do 60%. Izrađuju se od bakreni cijevi s aluminijskim ili s bakrenim orebrenjem.

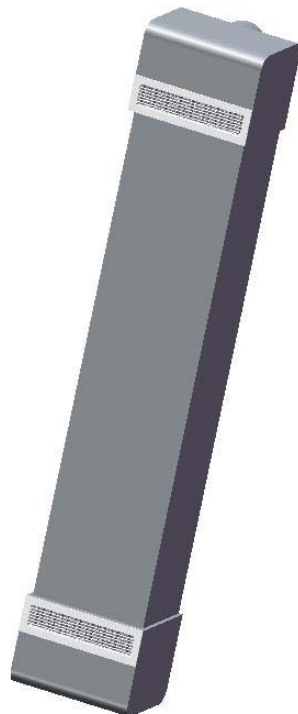
1.2.3 Kružni cirkulacijski sustavi



Slika 7. Kružni cirkulacijski sustav povrata topline

U ovim sustavima povrata topline izmjena topline obavlja se posredstvom radnog medija (voda, voda-etilenglikol). Radni medij cirkulira kroz zatvoreni sustav koji se sastoji od dva orebrena izmjenjivača topline, pumpe, cjevovoda, troputnog ventila i ekspanzijske posude. Jedan se izmjenjivač nalazi u toplijoj struji i tu radni medij prima toplinu te je odnosi u drugi izmjenjivač koji se nalazi u hladnijoj struji. Regulacija učina se obavlja uz pomoć troputnog ventila. Stupanj povrata topline kreće se u granicama od 40 do 60%.

2. TEHNIČKI OPIS IZMJENJIVAČA



Slika 8. 3D model izmjenjivača

Uređaj je konstruiran za rekuperaciju topline iz otpadnog zraka zagrijavanih uredskih prostora. Temperatura u uredskim prostorima održava se na 22°C, dok je vanjska temperatura od 15 do -15°C. Volumen uredskih prostorija je 100m³, što uz zahtijevanih pet izmjena zraka na sat znači da je izmjenjivač konstruiran za nazivni protok zraka od 500m³/h. Strujanje otpadnog i svježeg zraka kroz izmjenjivač je istosmjerno.

Površina izmjene topline (saće) izrađena je od šest ekstrudiranih aluminijskih profila koji se spajaju lijepljenjem. Na vrhu i dnu saća postavljaju se razdjelnici koji razdvajaju struje otpadnog i svježeg zraka. Na njih se još montiraju glave izrađene od aluminijskog lijeva. Na njima su istrujni i usisni otvori na koje se montiraju žaluzine CGS-400-100 proizvođača Lindab, te otvori za usis svježeg i ispuh otpadnog zraka. Protok zraka kroz izmjenjivač

osiguravaju dva kanalna ventilatora CBUV 160 C proizvođača Lindab. Snaga ventilatora je 100W i pri radu proizvode 50dB buke.

Stupanj povrata topline ovog rekuperatora pri nazivnim protocima je 46% pri čemu pad tlaka iznosi 214Pa.

3. TOPLINSKI PRORAČUN

Proračunski parametri

Temperatura vanjskog zraka: $\vartheta_1' = -15 \div 15 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura unutrašnjeg zraka: $\vartheta_2' = 22 \text{ }^\circ\text{C}$

Veličina prostorije: $V = 100 \text{ m}^3$

Broj izmjena zraka za uredske prostore $ACH = 3 \div 6 \text{ h}^{-1}$, Reknagel str. 1476.

Protok zraka kroz rekuperator uz izabrani broj izmjena zraka: $ACH = 5 \text{ h}^{-1}$

$$q_V = ACH \cdot V = 5 \cdot 100 = 500 \text{ m}^3/\text{h} = 0,1389 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.1 Izračun koeficijenta konvektivnog prijelaza topline i temperatura zraka na izlazu iz izmjenjivača

Izračun se vrši prema: Predlošcima za vježbe iz termodinamike II

Raynoldsova značajka

$$Re = \frac{wd_e}{\nu} = \frac{wd_e\rho}{\eta}$$

Pecletova značajka

$$Pe = \frac{wd_e}{a}$$

Ekvivalentni promjer strujanja

$$d_e = \frac{2ab}{a+b}$$

Nusseltova značajka pri laminarnom strujanju ($Re < \sim 3000$)

$$Nu = \frac{\alpha d_e}{\lambda} = 1,86 \left(Pe \cdot \frac{d}{L} \right)^{1/3}$$

Nusseltova značajka pri izobraženom turbulentnom strujanju ($Re > \sim 3000$, i $L > 40d$)

$$Nu = \frac{\alpha d_e}{\lambda} = \frac{0,0366 \cdot Pe^{0,75}}{1 - 0,483 \cdot Pe^{-0,125}}$$

Koeficijent prijelaza topline pri laminarnom strujanju

$$\alpha_L = \frac{1,86 \left(Pe \cdot \frac{d}{L} \right)^{1/3} \lambda}{d_e}$$

Koeficijent prijelaza topline pri turbulentnom strujanju

$$\alpha_T = \frac{0,0366 \cdot Pe^{0,75} \lambda}{1 - 0,483 \cdot Pe^{-0,125} d_e}$$

Bezdimenzijske značajke izmjenjivača

$$\pi_1 = \frac{\vartheta_1' - \vartheta_1''}{\vartheta_1' - \vartheta_2'}$$

$$\pi_2 = \frac{kA}{C_1}$$

$$\pi_3 = \frac{C_1}{C_2}$$

Vrijednosti značajke π_2 očitavane su iz dijagrama u predlošcima za vježbe iz termodinamike II, strana 73.

Toplinski kapaciteti struje svježeg zraka

$$C_1 = q_{m1} c_p$$

Toplinski kapacitet struje otpadnog zraka

$$C_2 = q_{m2} c_p$$

Brzina strujanja

$$w = \frac{q_v}{nab}$$

Koeficijent prolaza topline

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Površina izmjene topline

$$A = (2n - 1)aL$$

Temperatura struje svježeg zraka pri ubacivanju u prostoriju

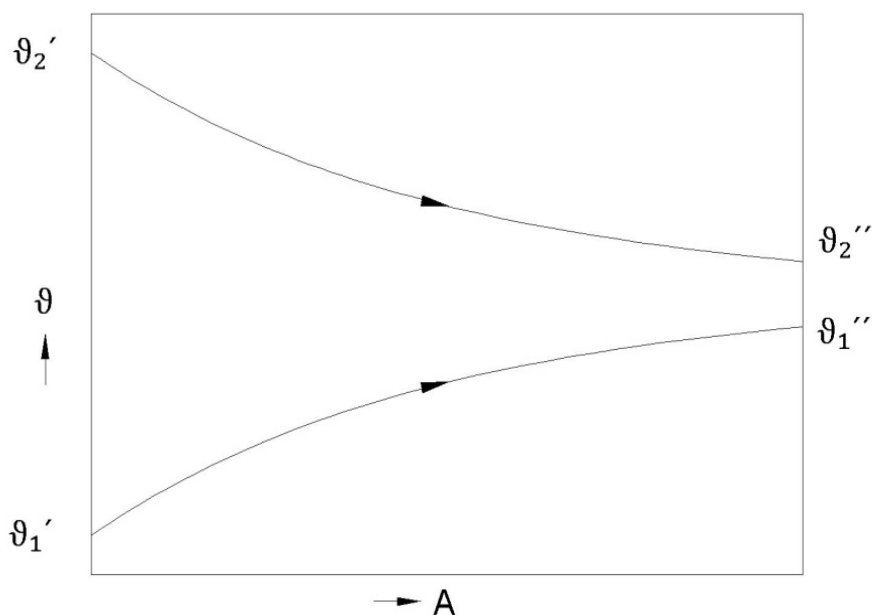
$$\vartheta_1'' = \vartheta_1' - \pi_1(\vartheta_1' - \vartheta_2')$$

Toplinski tok izračunat preko razlike temperatura pojedine struje na ulazu i izlazu iz izmjenjivača

$$\dot{Q} = q_v \rho_1 c_{p1}(\vartheta_1'' - \vartheta_1') = q_v \rho_2 c_{p2}(\vartheta_2' - \vartheta_2'')$$

Toplinski tok izračunat preko srednje logaritamske razlike temperatura struja otpadnog i svježeg zraka

$$\dot{Q}_m = kA\Delta\vartheta_m$$



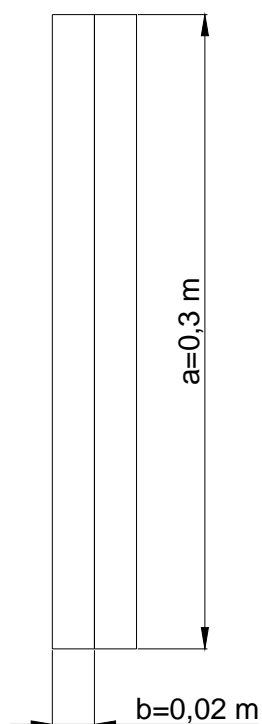
Slika 9. ϑ, A - dijagram istosmjernog izmjenjivača topline

Srednja logaritamska razlika temperatura

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\vartheta_2' - \vartheta_1' - \vartheta_2'' + \vartheta_1''}{\ln \frac{\vartheta_2' - \vartheta_1'}{\vartheta_2'' - \vartheta_1''}}$$

3.1.1 Analiza 1

Analiza se provodi za sljedeći poprečni presjek kanala strujanja



Slika 10. Osnovni element presjeka strujanja

Brzina strujanja se mijenja promjenom broja osnovnih elemenata **n**.

Ekvivalentni promjer strujanja

$$d_e = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 0,02}{0,3 + 0,02} = 0,0375 \text{ m}$$

Visina izmjenjivača

$$L = 1,9 \text{ m}$$

Provjera uvjeta izobraženog turbulentnog strujanja

$$\frac{L}{d_e} = \frac{2}{0,037} = 54,05 > 40d_e = 40 \cdot 0,037 = 1,48$$

Pretpostavljena temperatura otpadnog zraka na izlazu iz izmjenjivača

$$\vartheta_2'' = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja temperatura struje otpadnog zraka

$$\vartheta_{m2}'' = \frac{\vartheta_2' + \vartheta_2''}{2} = \frac{22 + 8}{2} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Svojstva zraka za 15 °C

- Gustoća: $\rho = 1,185 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet: $c_p = 1,011 \text{ kJ/kgK}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti: $\lambda = 0,0248 \text{ W/mK}$
- Dinamička žilavost: $\eta = 18,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$

Koeficijent temperaturne vodljivosti

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{0,0248}{1,185 \cdot 1011} = 0,0000207 \text{ m}^2/\text{s}$$

Pretpostavljena temperatura svježeg zraka na izlazu iz izmjenjivača

$$\vartheta_1'' = -3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja temperatura struje otpadnog zraka

$$\vartheta_{m1}'' = \frac{\vartheta_1' + \vartheta_1''}{2} = \frac{-15 - 3}{2} = -9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Svojstva zraka za $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$

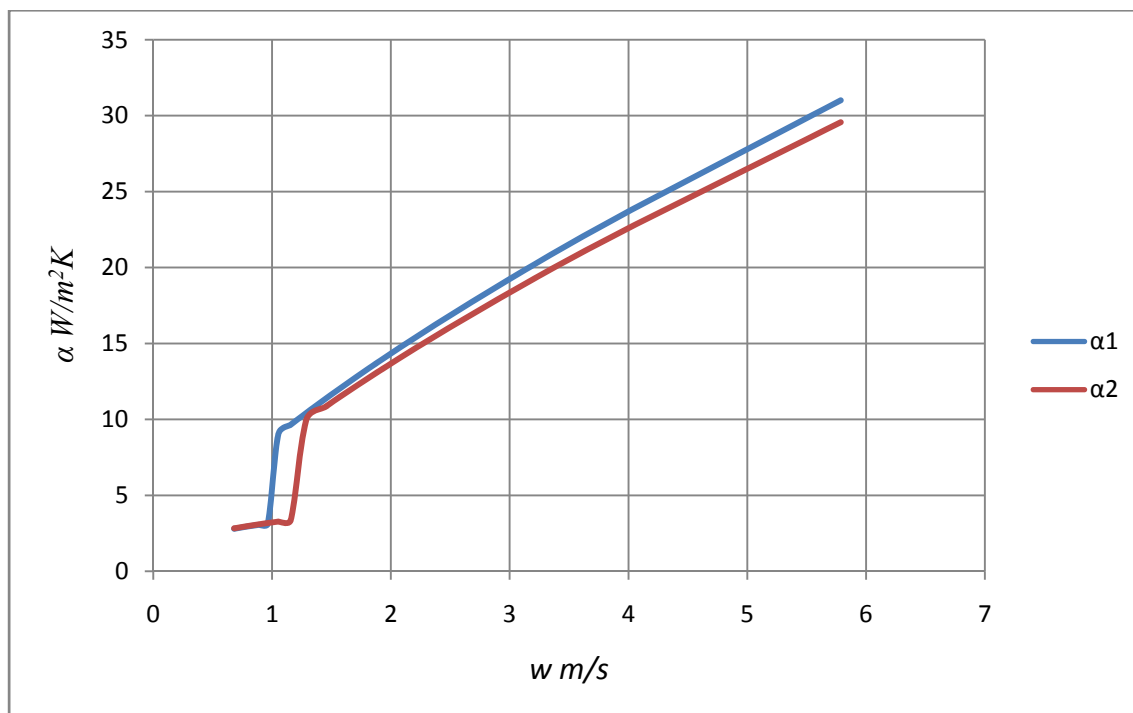
- Gustoća: $\rho = 1,303\text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet: $c_p = 1,008\text{ kJ/kgK}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti: $\lambda = 0,0232\text{ W/mK}$
- Dinamička žilavost: $\eta = 16,96 \cdot 10^{-6}\text{ Ns/m}^2$

Koeficijent temperaturne vodljivosti

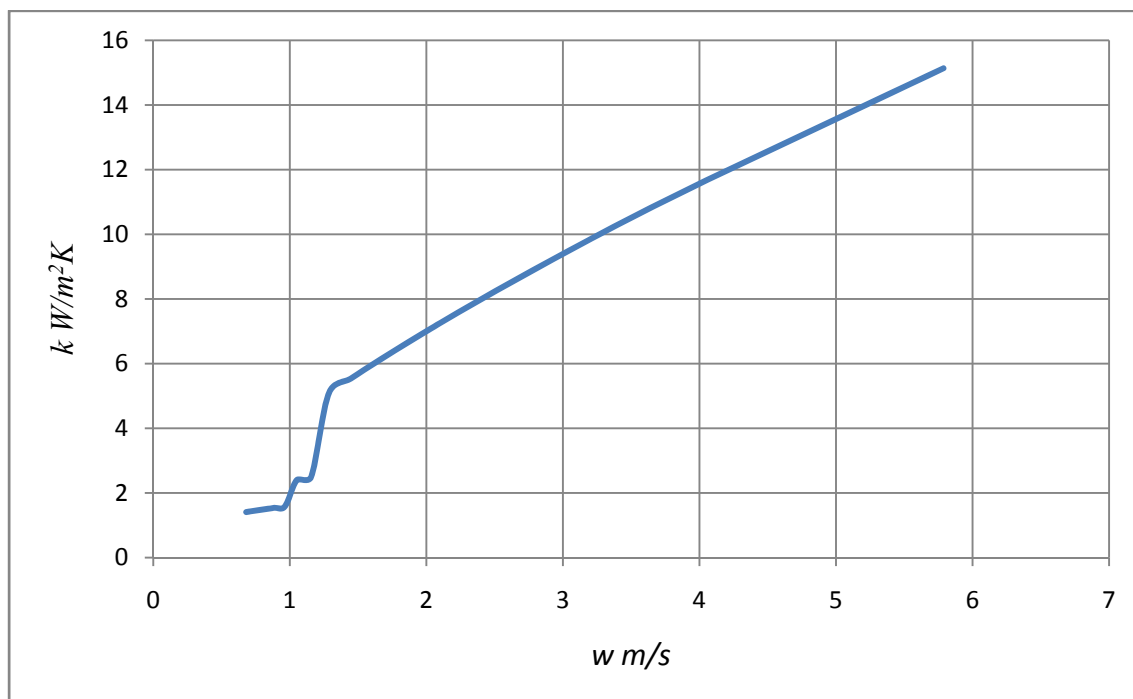
$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{0,0232}{1,303 \cdot 1008} = 0,00001766\text{ m}^2/\text{s}$$

Tabela 1. Određivanje koeficijenta prolaza topline pri protocima zraka $q_v=500\text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^{\circ}\text{C}$

n	w	Re ₁	Re ₂	Pe ₁	Pe ₂	α_1	α_2	k
/	m/s	/	/	/	/	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
4	5,788	16539	14248	12193	10485	31,01	29,57	15,13
6	3,858	11026	9499	8129	6990	23,09	22,02	11,27
8	2,894	8269	7124	6096	5242	18,73	17,87	9,15
10	2,315	6616	5699	4877	4194	15,93	15,20	7,78
12	1,929	5513	4749	4064	3495	13,96	13,32	6,82
14	1,654	4725	4071	3484	2996	12,49	11,92	6,10
16	1,447	4135	3562	3048	2621	11,34	10,82	5,54
18	1,286	3675	3166	2710	2330	10,41	9,94	5,08
20	1,158	3308	2850	2439	2097	9,65	3,377	2,50
22	1,052	3007	2591	2217	1906	9,01	3,271	2,40
24	0,965	2756	2375	2032	1747	3,140	3,178	1,58
26	0,890	2544	2192	1876	1613	3,057	3,094	1,54
28	0,827	2363	2035	1742	1498	2,983	3,019	1,50
30	0,772	2205	1900	1626	1398	2,915	2,950	1,47
32	0,723	2067	1781	1524	1311	2,853	2,887	1,43
34	0,681	1946	1676	1434	1233	2,796	2,830	1,41



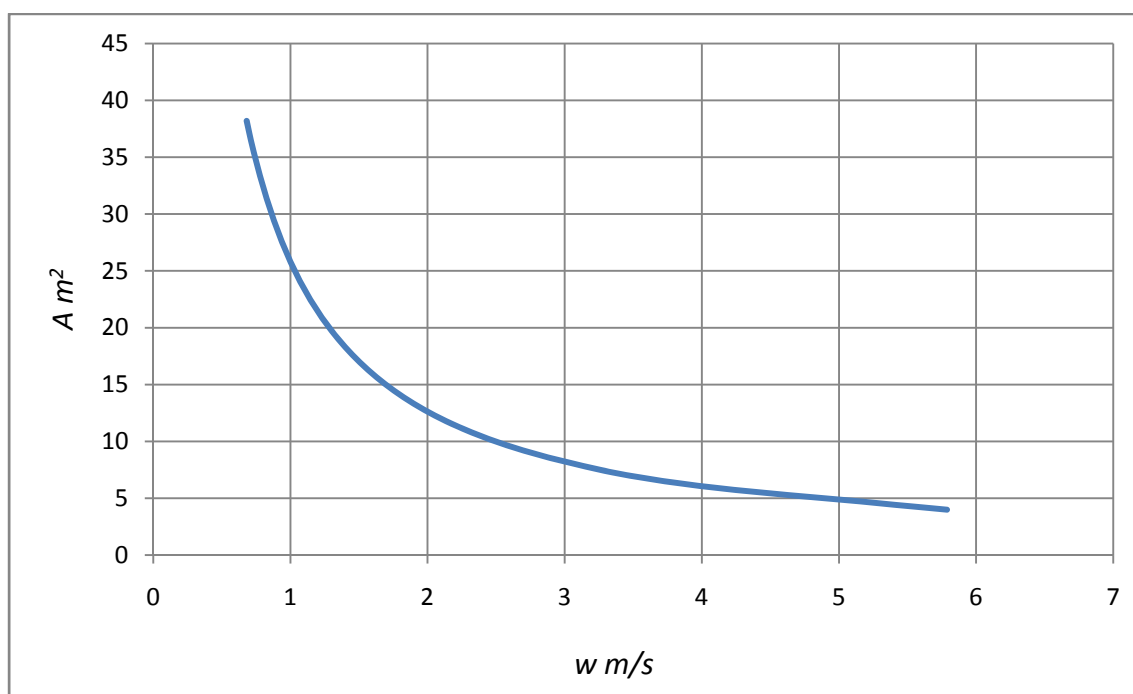
Slika 11. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500$ m³/h i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$



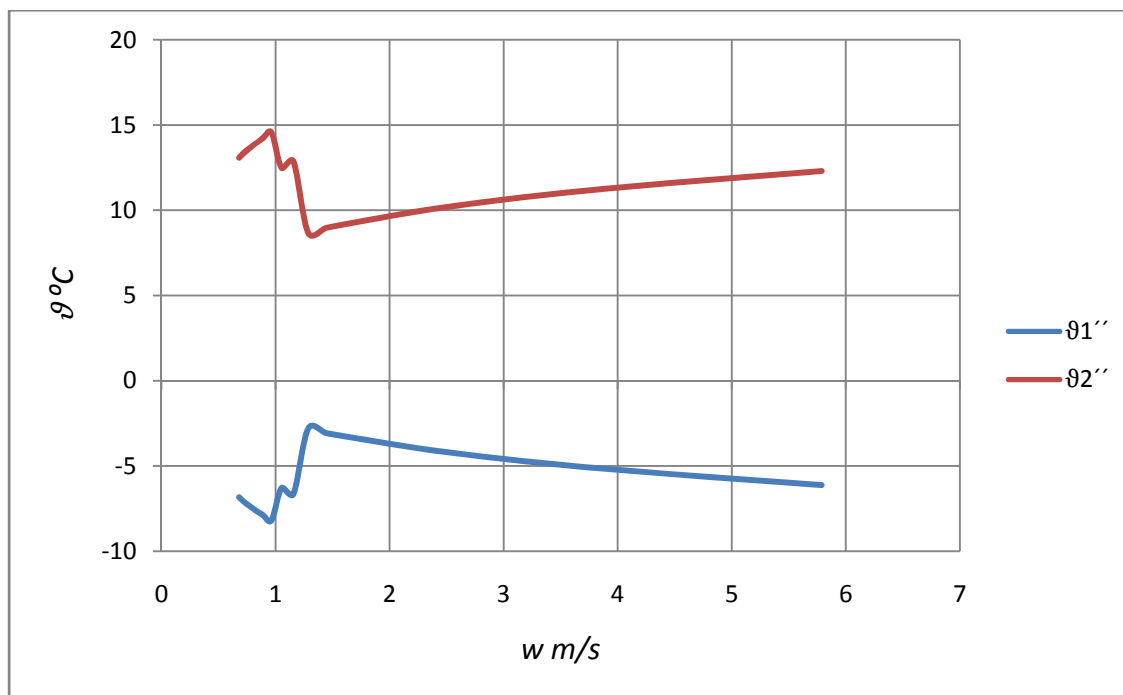
Slika 12. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500$ m³/h i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

Tabela 2. Određivanje temperatura na izlazu iz izmjenjivača pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

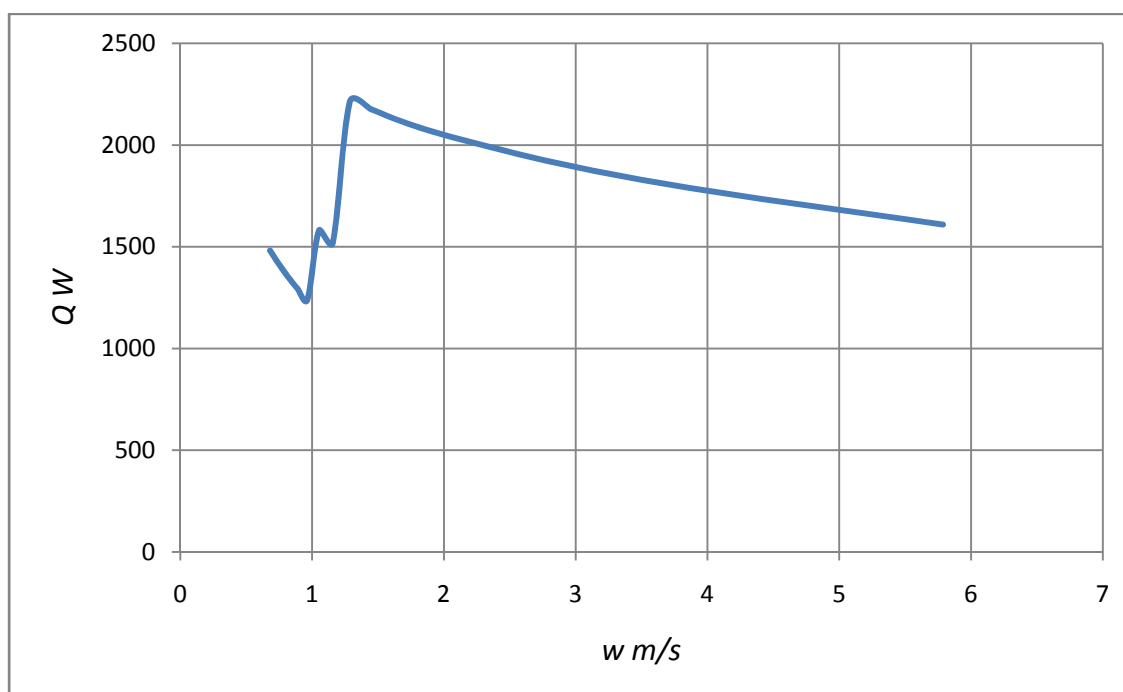
w	A	π_2	π_1	ϑ_1''	ϑ_2''	\dot{Q}	$\Delta\vartheta_m$	\dot{Q}_m
m/s	m ²	/	/	°C	°C	W	°C	W
5,788	3,99	0,357	0,262	-6,13	12,31	1613	26,65	1609
3,858	6,27	0,418	0,2906	-5,16	11,25	1789	25,32	1789
2,894	8,55	0,462	0,31	-4,50	10,53	1909	24,39	1907
2,315	10,83	0,498	0,324	-4,03	10,01	1995	23,69	1996
1,929	13,11	0,528	0,336	-3,62	9,57	2069	23,08	2063
1,654	15,39	0,555	0,345	-3,31	9,24	2124	22,61	2122
1,447	17,67	0,578	0,352	-3,08	8,98	2167	22,24	2176
1,286	19,95	0,600	0,36	-2,81	8,68	2216	21,81	2213
1,158	22,23	0,329	0,247	-6,63	12,86	1521	27,32	1519
1,052	24,51	0,348	0,257	-6,29	12,49	1582	26,87	1581
0,965	26,79	0,250	0,201	-8,19	14,56	1237	29,30	1240
0,890	29,07	0,264	0,21	-7,89	14,23	1293	28,92	1293
0,827	31,35	0,278	0,218	-7,62	13,93	1342	28,58	1344
0,772	33,63	0,291	0,226	-7,34	13,64	1391	28,24	1392
0,723	35,91	0,305	0,233	-7,11	13,38	1434	27,93	1439
0,681	38,19	0,317	0,241	-6,84	13,08	1484	27,58	1481



Slika 13. Promjena površine izmjene topline s promjenom brzine strujanja uz protoke zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$



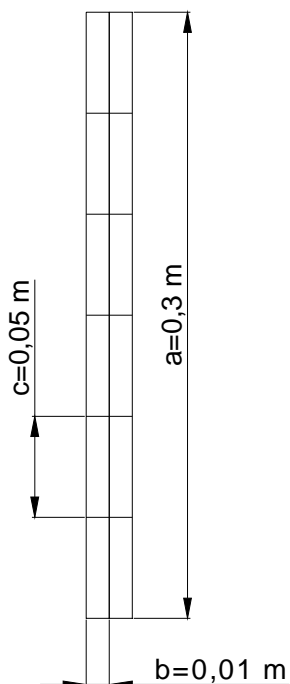
Slika 14. Ovisnost temperature ubacivanja svježeg zraka u prostoriju (θ_1'') i temperature izbacivanja otpadnog zraka (θ_2'') o brzini strujanja pri vanjskoj temperaturi $\theta_1' = -15^{\circ}\text{C}$



Slika 15. Ovisnost toplinskog toka Q o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1' = -15^{\circ}\text{C}$

3.1.2 Analiza 2

U ovom slučaju smanjena je širina kanala da bi se povećala površina izmjene topline i dodane su poprečne pregrade.



Slika 16. Osnovni element presjeka strujanja

Ekvivalentni promjer strujanja

$$d_e = \frac{2bc}{b+c} = \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 0,05}{0,01 + 0,05} = 0,01667 \text{ m}$$

Pretpostavljena temperatura otpadnog zraka na izlazu iz izmjenjivača

$$\vartheta_2'' = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja temperatura struje otpadnog zraka

$$\vartheta_{m2}'' = \frac{\vartheta_2' + \vartheta_2''}{2} = \frac{22 + 5}{2} = 13,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Svojstva zraka za 13,5 °C

- Gustoća: $\rho = 1,191 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet: $c_p = 1,01 \text{ kJ/kgK}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti: $\lambda = 0,0249 \text{ W/mK}$
- Dinamička žilavost: $\eta = 18,01 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$

Koeficijent temperaturne vodljivosti

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{0,0249}{1,191 \cdot 1010} = 0,0000207 \text{ m}^2/\text{s}$$

Pretpostavljena temperatura svježeg zraka na izlazu iz izmjenjivača

$$\vartheta_1'' = 1 \text{ °C}$$

Srednja temperatura struje otpadnog zraka

$$\vartheta_{m1}'' = \frac{\vartheta_1' + \vartheta_1''}{2} = \frac{-15 + 1}{2} = -7 \text{ °C}$$

Svojstva zraka za -7 °C

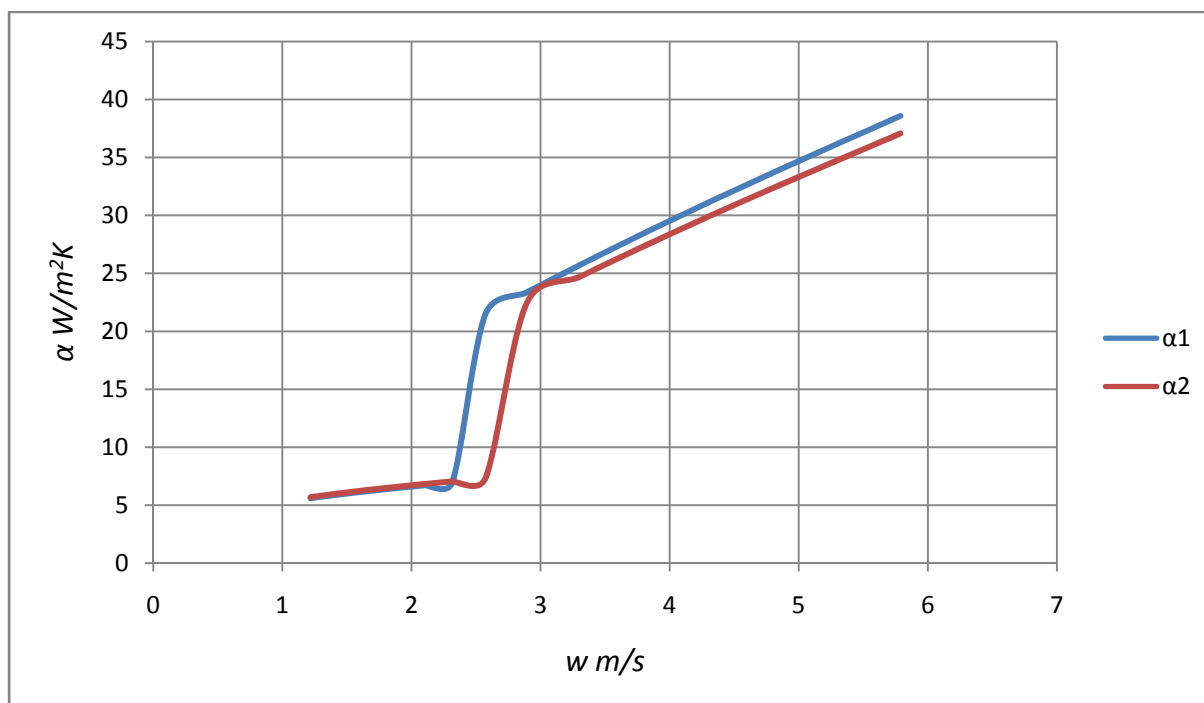
- Gustoća: $\rho = 1,292 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet: $c_p = 1,009 \text{ kJ/kgK}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti: $\lambda = 0,0233 \text{ W/mK}$
- Dinamička žilavost: $\eta = 17,08 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$

Koeficijent temperaturne vodljivosti

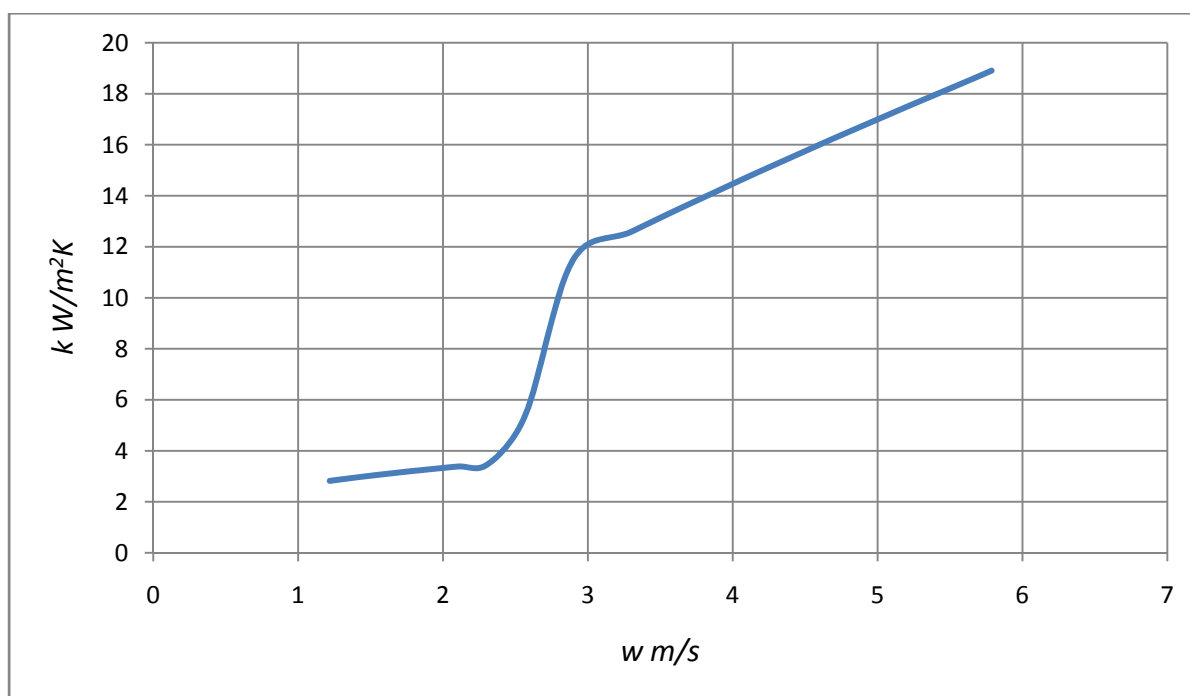
$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{0,0233}{1,292 \cdot 1009} = 0,00001787 \text{ m}^2/\text{s}$$

Tabela 3. Određivanje koeficijenta prolaza topline pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

n	w	Re ₁	Re ₂	Pe ₁	Pe ₂	α_1	α_2	k
/	m/s	/	/	/	/	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
8	5,788	7298	6380	5399	4661	38,59	37,07	18,90
10	4,630	5838	5104	4319	3729	32,82	31,53	16,08
12	3,858	4865	4253	3599	3107	28,76	27,64	14,09
14	3,307	4170	3646	3085	2663	25,73	24,72	12,61
16	2,894	3649	3190	2699	2330	23,36	22,45	11,45
18	2,572	3244	2836	2399	2071	21,46	20,55	10,29
20	2,315	2919	2552	2160	1864	19,93	19,02	9,14
22	2,105	2654	2320	1963	1695	18,74	17,83	8,29
24	1,929	2433	2127	1800	1554	17,82	16,91	7,64
26	1,781	2246	1963	1661	1434	17,14	16,23	7,19
28	1,654	2085	1823	1543	1332	16,65	15,74	6,84
30	1,543	1946	1701	1440	1243	16,30	15,39	6,59
32	1,447	1824	1595	1350	1165	16,06	15,15	6,45
34	1,362	1717	1501	1270	1097	15,90	15,00	6,39
36	1,286	1622	1418	1200	1036	15,80	14,90	6,34
38	1,218	1536	1343	1137	981	15,74	14,84	6,30



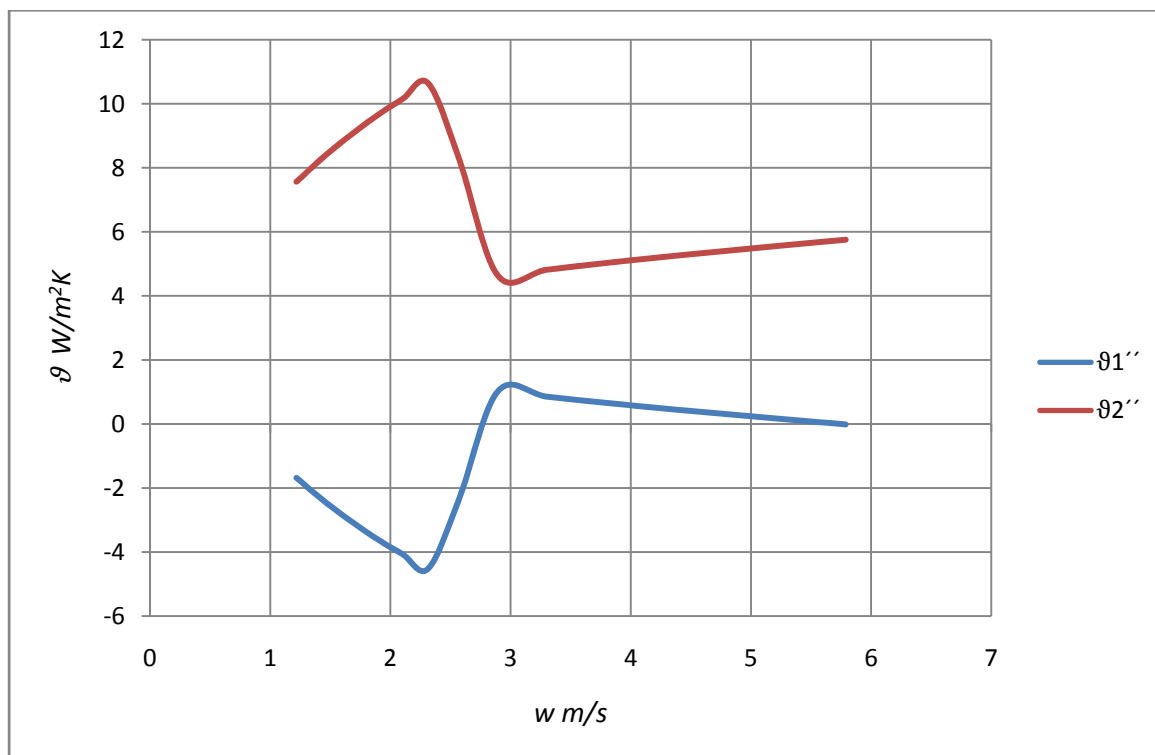
Slika 17. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$



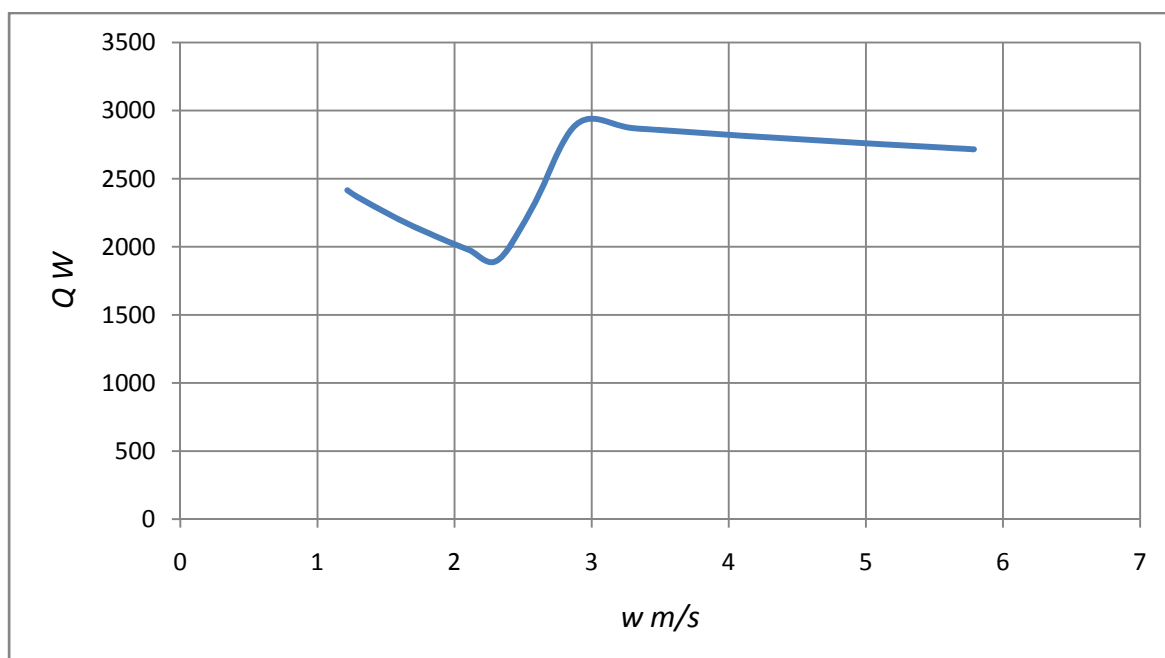
Slika 18. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

Tabela 4. Određivanje temperatura na izlazu iz izmjenjivača pri protocima zraka $q_v=500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

w	A	π_2	π_1	ϑ_1''	ϑ_2''	\dot{Q}_1	$\Delta\vartheta_m$	\dot{Q}
m/s	m ²	/	/	°C	°C	W	°C	W
5,788	8,55	0,967	0,439	-0,01	5,76	2714	16,81	2716
4,630	10,83	1,042	0,45	0,36	5,35	2782	15,97	2782
3,858	13,11	1,106	0,458	0,64	5,05	2831	15,33	2833
3,307	15,39	1,161	0,4643	0,85	4,82	2870	14,80	2871
2,894	17,67	1,211	0,4693	1,02	4,64	2901	14,35	2903
2,572	19,95	0,651	0,371	-2,33	8,27	2293	21,12	2296
2,315	22,23	0,465	0,307	-4,52	10,64	1898	24,48	1902
2,105	24,51	0,497	0,32	-4,07	10,16	1978	23,83	1978
1,929	26,79	0,527	0,3314	-3,69	9,74	2049	23,25	2049
1,781	29,07	0,557	0,342	-3,32	9,35	2114	22,70	2114
1,654	31,35	0,586	0,352	-2,98	8,98	2176	22,17	2172
1,543	33,63	0,615	0,3606	-2,69	8,66	2229	21,70	2229
1,447	35,91	0,642	0,369	-2,40	8,35	2281	21,24	2279
1,362	38,19	0,669	0,3765	-2,15	8,07	2327	20,81	2328
1,286	40,47	0,696	0,384	-1,89	7,79	2374	20,38	2370
1,218	42,75	0,722	0,39	-1,68	7,57	2411	20,02	2416

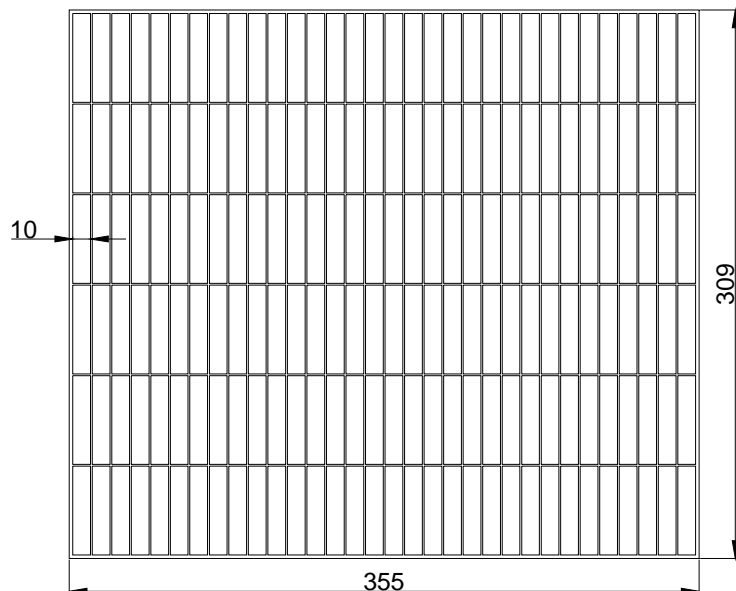


Slika 19. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500$ m³/h i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

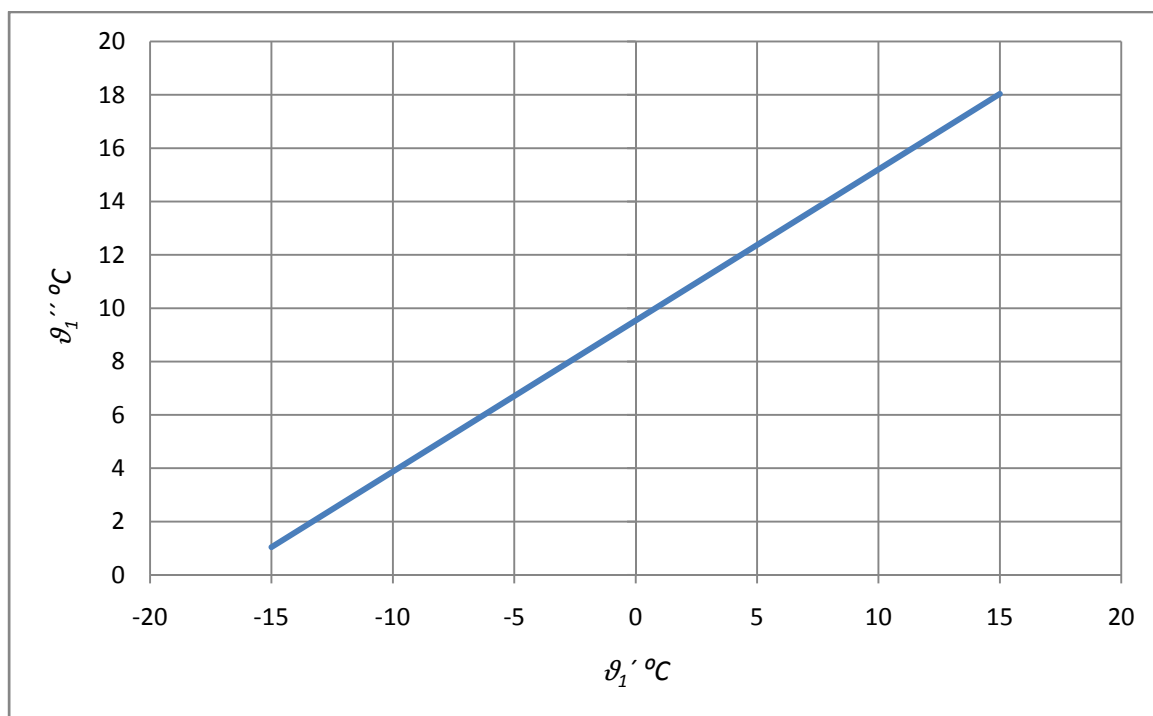


Slika 20. Ovisnost toplinskog toka Q o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500$ m³/h i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

Ako bi se išlo sa ovakvim osnovnim elementom strujanja izmjenjivač bi najviši učin imao ako bi presjek strujanja bio sastavljen od 16 osnovnih elemenata pri čemu je brzina strujanja zraka kroz izmjenjivač $w = 2,894 \text{ m/s}$. Takav presjek je prikazan na sljedećoj slici.



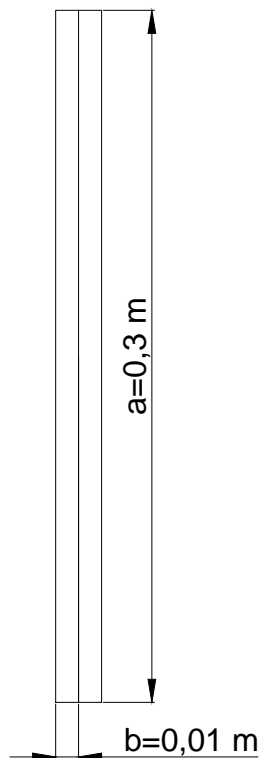
Slika 21. Poprečni presjek izmjenjivača



Slika 22. Ovisnost temperature ubacivanja o vanjskoj temperaturi za odabrani presjek

3.1.3 Analiza 3

Druga moguća modifikacija je da se izbace poprečne pregrade. I u ovom je slučaju smanjena širina kanala da bi se povećala površina izmjene topline.



Slika 23. Osnovni element presjeka strujanja

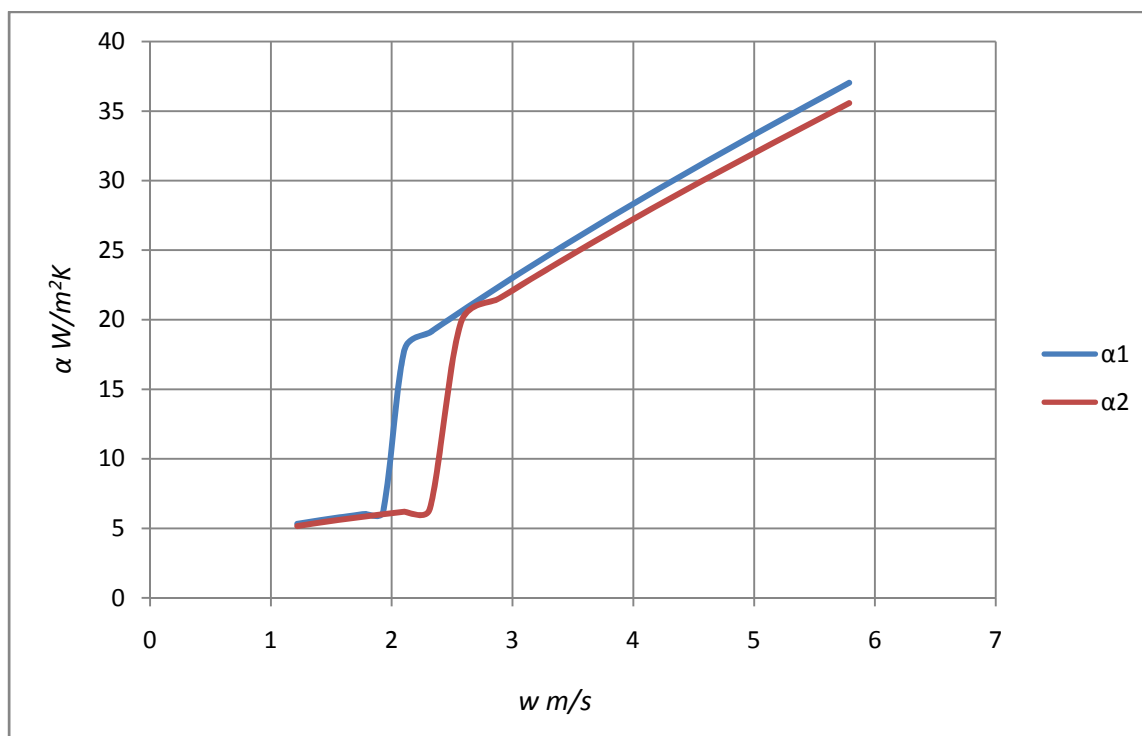
Ekvivalentni promjer strujanja

$$d_e = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 0,01}{0,3 + 0,01} = 0,01935 \text{ m}$$

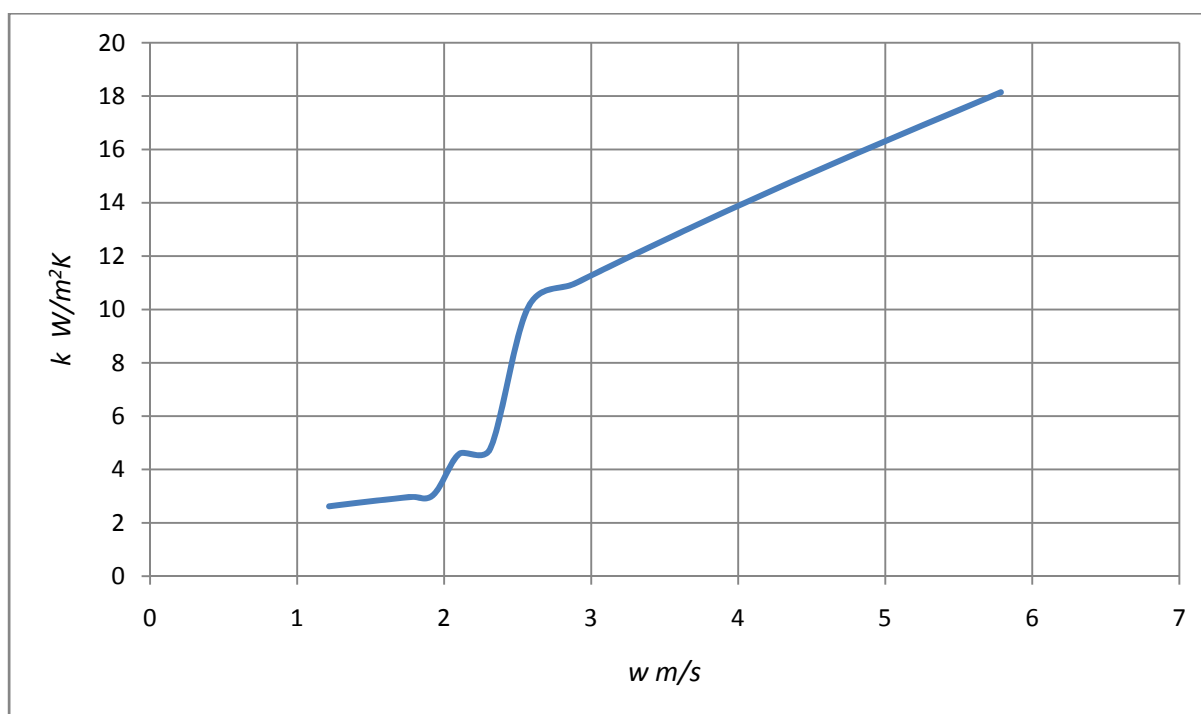
U ovoj se analizi u proračun ide sa istim pretpostavljenim temperaturama kao u prethodnom slučaju.

Tabela 5. Određivanje koeficijenta prolaza topline uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

n	w	Re ₁	Re ₂	Pe ₁	Pe ₂	α_1	α_2	k
/	m/s	/	/	/	/	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
8	5,788	8471	7406	6267	5410	37,04	35,58	18,15
10	4,630	6777	5925	5013	4328	31,50	30,26	15,43
12	3,858	5647	4937	4178	3607	27,60	26,52	13,53
14	3,307	4841	4232	3581	3091	24,69	23,72	12,10
16	2,894	4236	3703	3133	2705	22,42	21,54	10,98
18	2,572	3765	3291	2785	2404	20,59	19,78	10,09
20	2,315	3388	2962	2507	2164	19,08	18,35	9,78
22	2,105	3080	2693	2279	1967	17,81	16,86	9,59
24	1,929	2824	2469	2089	1803	16,206	16,009	9,05
26	1,781	2607	2279	1928	1665	15,043	15,851	8,97
28	1,654	2420	2116	1791	1546	14,895	15,708	8,90
30	1,543	2259	1975	1671	1443	14,761	15,578	8,83
32	1,447	2118	1851	1567	1353	14,638	15,459	8,77
34	1,362	1993	1743	1475	1273	14,526	15,350	8,72
36	1,286	1882	1646	1393	1202	14,421	15,249	8,67
38	1,218	1783	1559	1319	1139	14,325	15,155	8,62



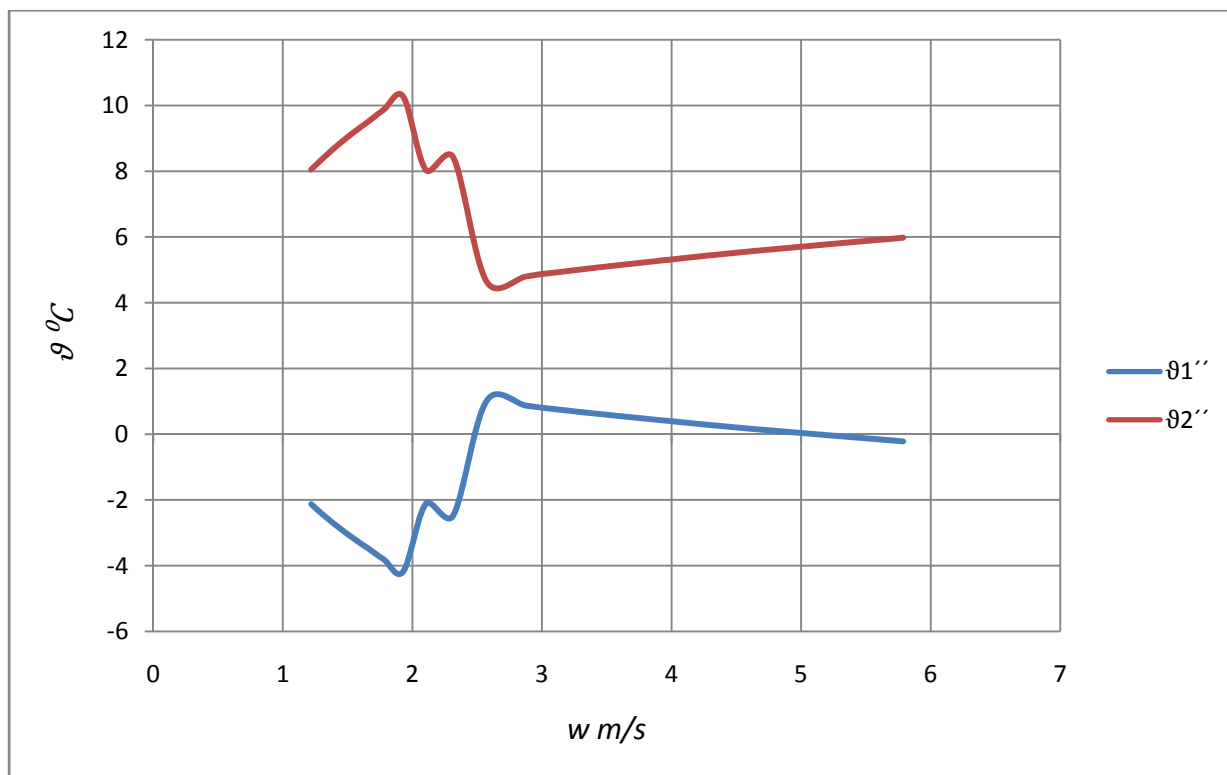
Slika 24. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$



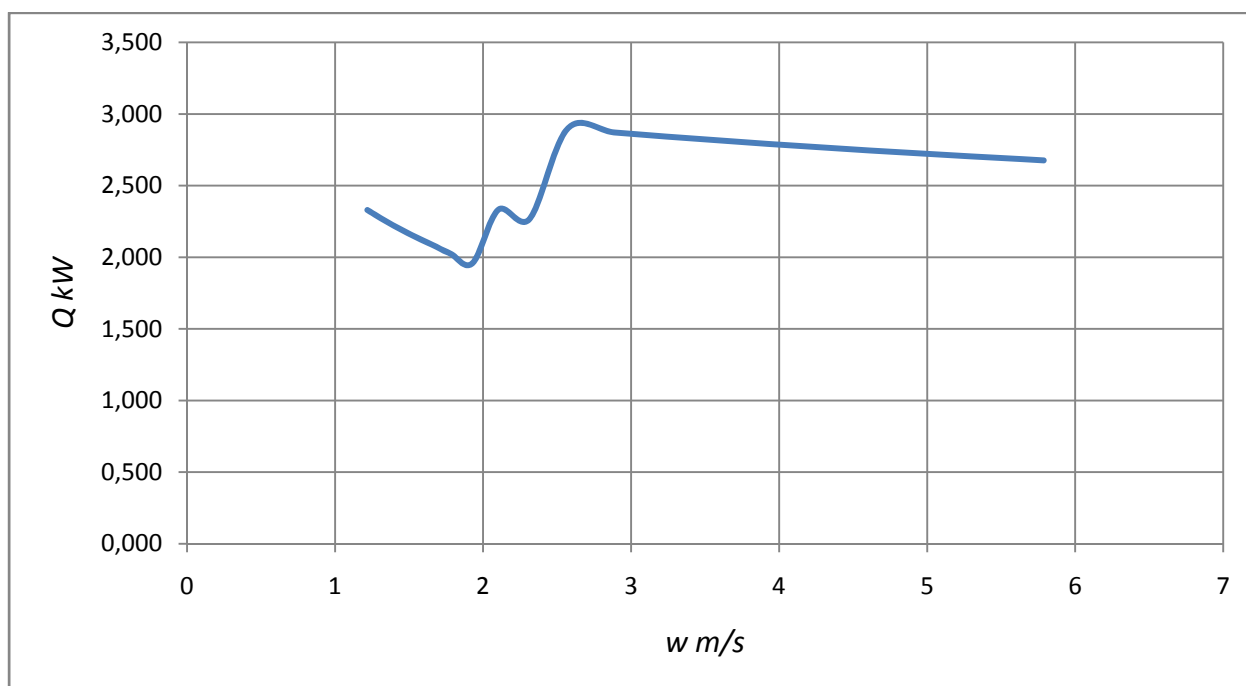
Slika 25. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

Tabela 6. Određivanje toplinskog toka uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

w	A	π_2	π_1	ϑ_1''	ϑ_2''	\dot{Q}_1	$\Delta\vartheta_m$	\dot{Q}
m/s	m ²	/	/	°C	°C	W	°C	W
5,788	8,55	0,929	0,433	-0,22	5,98	2677	17,24	2674
4,630	10,83	1,000	0,444	0,16	5,57	2745	16,43	2747
3,858	13,11	1,061	0,4525	0,45	5,26	2797	15,78	2797
3,307	15,39	1,114	0,459	0,67	5,02	2837	15,25	2839
2,894	17,67	1,162	0,4644	0,86	4,82	2871	14,79	2870
2,572	19,95	1,204	0,469	1,01	4,65	2899	14,38	2894
2,315	22,23	0,636	0,367	-2,47	8,42	2269	21,35	2270
2,105	24,51	0,673	0,3775	-2,11	8,03	2334	20,75	2335
1,929	26,79	0,489	0,317	-4,18	10,27	1960	23,98	1961
1,781	29,07	0,517	0,3276	-3,82	9,88	2025	23,45	2026
1,654	31,35	0,544	0,338	-3,46	9,49	2089	22,91	2083
1,543	33,63	0,570	0,3465	-3,17	9,18	2142	22,46	2141
1,447	35,91	0,596	0,355	-2,88	8,87	2194	22,01	2192
1,362	38,19	0,621	0,3625	-2,62	8,59	2241	21,60	2242
1,286	40,47	0,646	0,37	-2,37	8,31	2287	21,18	2286
1,218	42,75	0,670	0,377	-2,13	8,05	2330	20,78	2327

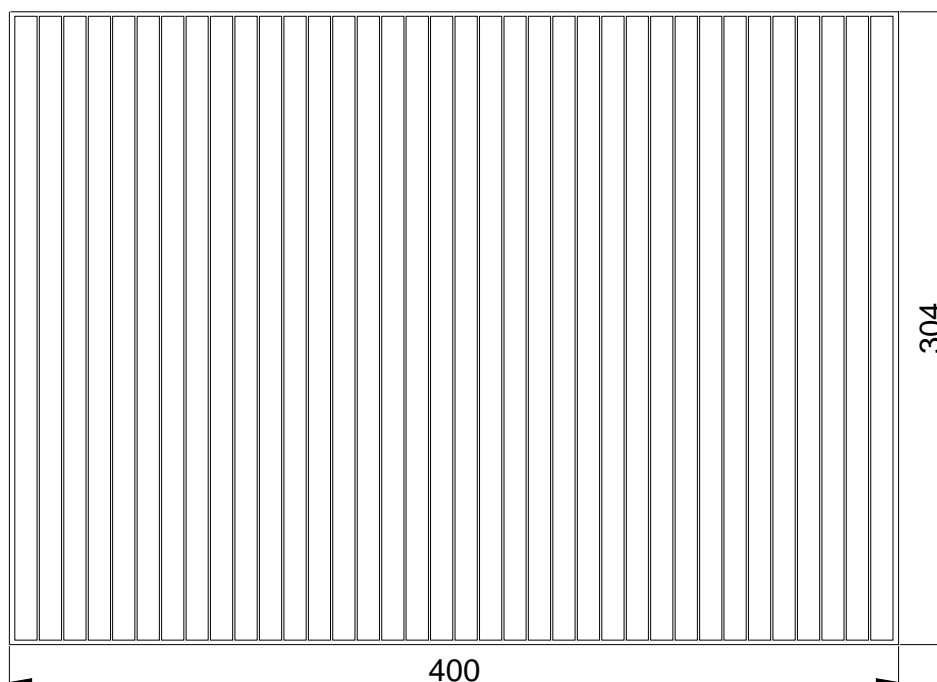


Slika 26. Ovisnost temperature ubacivanja svježeg zraka u prostoriju (θ_1'') i temperature izbacivanja otpadnog zraka (θ_2'') o brzini strujanja pri vanjskoj temperaturi $\theta_1' = -15^\circ\text{C}$



Slika 27. Ovisnost toplinskog toka Q o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1' = -15^\circ\text{C}$

Iz dvije prethodne dvije analize vidljivo je da bočne pregrade nemaju značajnijeg utjecaja na učin izmjenjivača. Njihov se utjecaj ubiti svodi na to da je potrebna veća brzina strujanja da bi nastupilo turbulentno strujanje. Zbog toga bi izmjenjivač bez bočni pregrada imao najviši učin s nešto većim brojem osnovnih elemenata (18). Presjek takvog izmjenjivača je prikazan na sljedećoj slici.

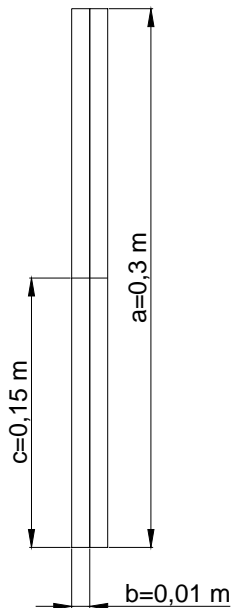


Slika 28. Poprečni presjek izmjenjivača

Nedostatak ovakvoga presjeka izmjenjivača je u tome što bi ga bilo dosta teško ekstrudirati u jednom komadu. Zbog toga je odlučio da se izraditi iz više dijelova. Svojstva takvog presjeka su analizirana u sljedećem poglavlju.

3.1.4 Analiza 4

Ova se analiza provodi za saće sastavljeno iz više dijelova. Saće je podijeljeno po širini na dva dijela a po dužini na tri dijela, tako da je cjelokupno saće sastavljeno iz 6 dijelova.



Slika 29. Osnovni element presjeka strujanja

Ekvivalentni promjer strujanja

$$d_e = \frac{2cb}{c+b} = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 0,01}{0,15 + 0,01} = 0,01875 \text{ m}$$

Pretpostavljena temperatura otpadnog zraka na izlazu iz izmjenjivača

$$\vartheta_2'' = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja temperatura struje otpadnog zraka

$$\vartheta_{m2}'' = \frac{\vartheta_2' + \vartheta_2''}{2} = \frac{22 + 4}{2} = 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Svojstva zraka za 13 °C

- Gustoća: $\rho = 1,193 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet: $c_p = 1,011 \text{ kJ/kgK}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti: $\lambda = 0,0246 \text{ W/mK}$
- Dinamička žilavost: $\eta = 17,99 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$

Koeficijent temperaturne vodljivosti

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{0,0246}{1,193 \cdot 1011} = 0,0000204 \text{ m}^2/\text{s}$$

Pretpostavljena temperatura svježeg zraka na izlazu iz izmjenjivača

$$\vartheta_1'' = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja temperatura struje otpadnog zraka

$$\vartheta_{m1}'' = \frac{\vartheta_1' + \vartheta_1''}{2} = \frac{-15 + 1}{2} = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Svojstva zraka za $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$

- Gustoća: $\rho = 1,292\text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet: $c_p = 1,009\text{ kJ/kgK}$
- Koeficijent toplinske vodljivosti: $\lambda = 0,0233\text{ W/mK}$
- Dinamička žilavost: $\eta = 17,08 \cdot 10^{-6}\text{ Ns/m}^2$

Koeficijent temperaturne vodljivosti

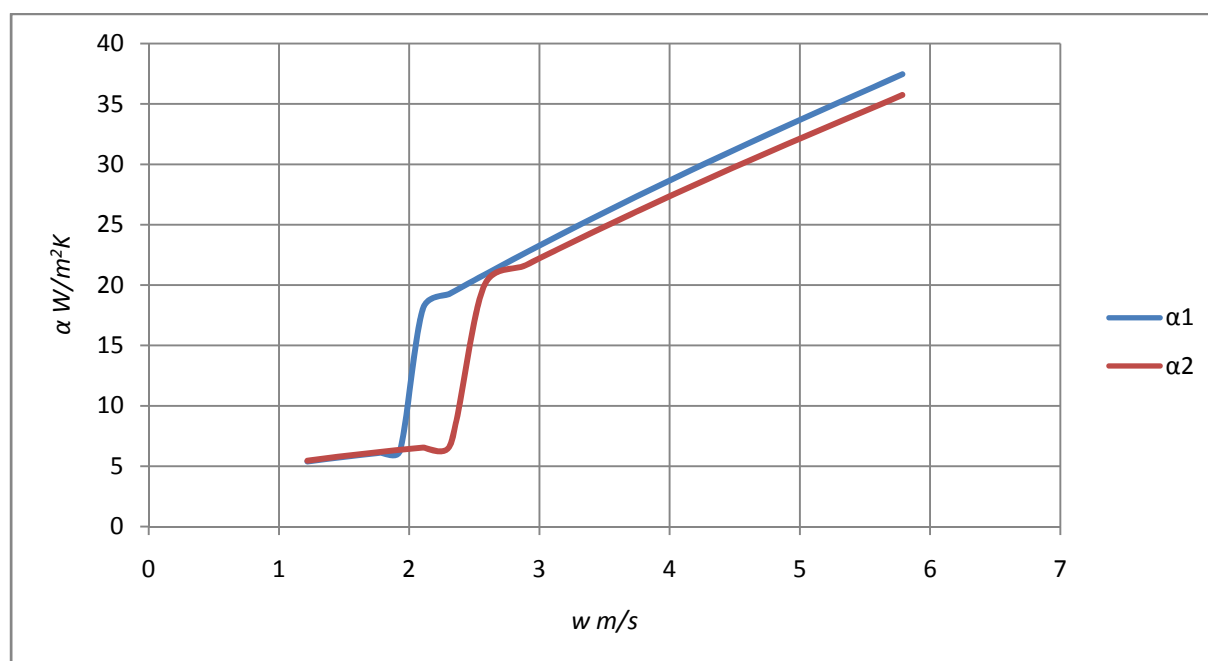
$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{0,0233}{1,292 \cdot 1009} = 0,00001787\text{ m}^2/\text{s}$$

Tabela 7. Određivanje koeficijenta prolaza topline pri protok zraka $q_v=500\text{ m}^3/\text{h}$

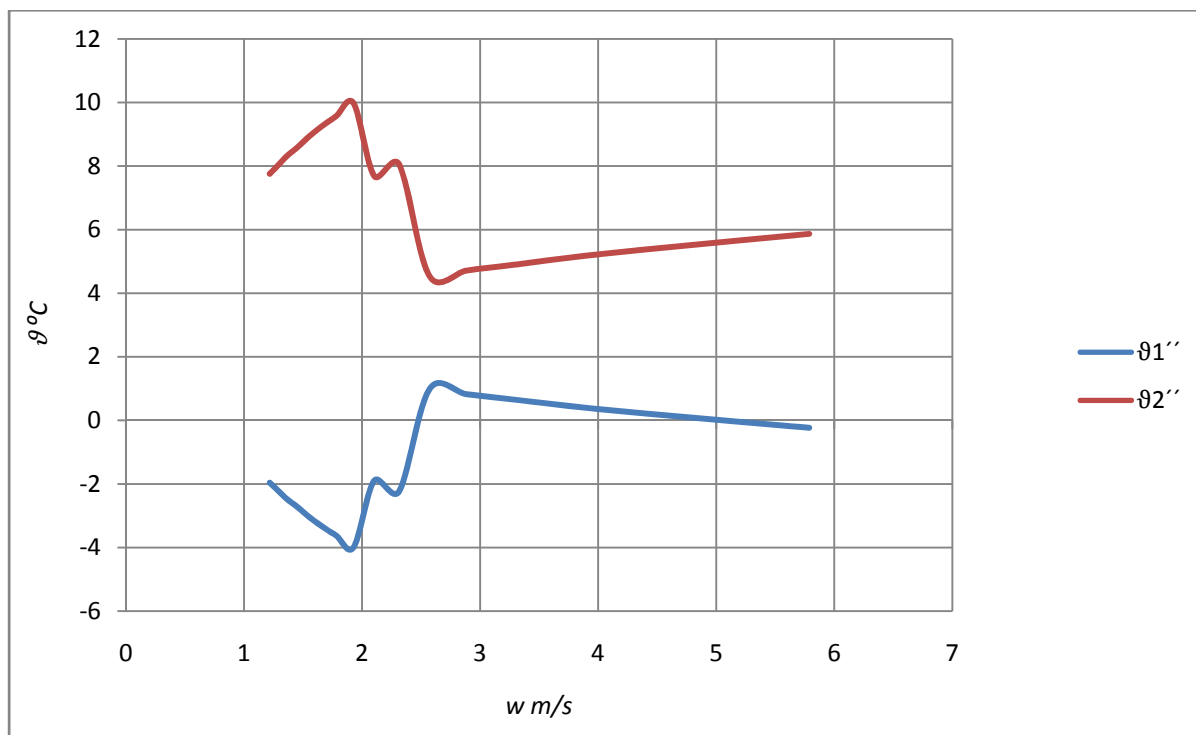
n	w	Re ₁	Re ₂	Pe ₁	Pe ₂	α_1	α_2	k
/	m/s	/	/	/	/	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
8	5,788	8269	7124	6096	5242	37,47	35,74	18,29
10	4,630	6616	5699	4877	4194	31,87	30,41	15,56
12	3,858	5513	4749	4064	3495	27,92	26,65	13,63
14	3,307	4725	4071	3484	2996	24,98	23,83	12,20
16	2,894	4135	3562	3048	2621	22,68	21,64	11,07
18	2,572	3675	3166	2710	2330	20,83	19,88	10,17
20	2,315	3308	2850	2439	2097	19,30	6,754	5,00
22	2,105	3007	2591	2217	1906	18,02	6,543	4,80
24	1,929	2756	2375	2032	1747	6,280	6,356	3,16
26	1,781	2544	2192	1876	1613	6,114	6,189	3,08
28	1,654	2363	2035	1742	1498	5,965	6,038	3,00
30	1,543	2205	1900	1626	1398	5,829	5,900	2,93
32	1,447	2067	1781	1524	1311	5,705	5,775	2,87
34	1,362	1946	1676	1434	1233	5,591	5,659	2,81
36	1,286	1838	1583	1355	1165	5,486	5,552	2,76
38	1,218	1741	1500	1283	1104	5,388	5,453	2,71

Tabela 8. Određivanje toplinskog toka uz protoke zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

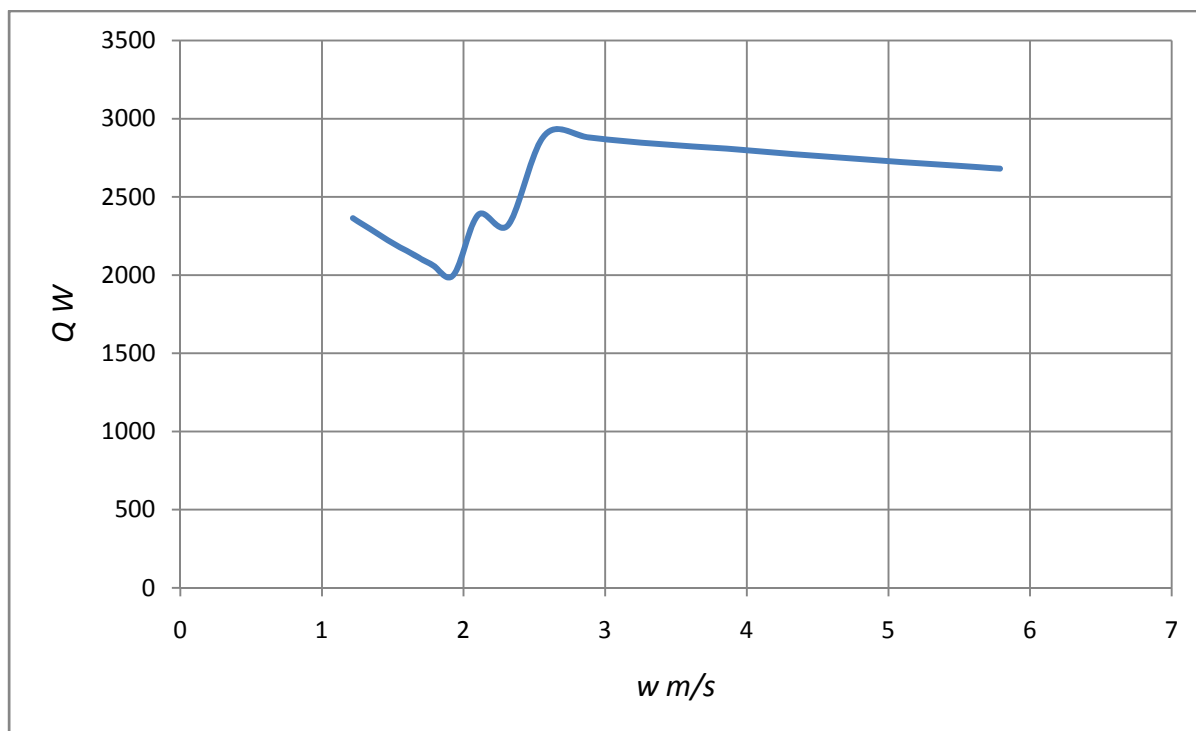
n	A	π_2	π_1	ϑ_1''	ϑ_2''	\dot{Q}_1	$\Delta\vartheta_m$	\dot{Q}
/	m^2	/	/	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	W	$^\circ\text{C}$	W
8	8,55	0,924	0,436	-0,23	5,87	2684	17,14	2681
10	10,83	0,996	0,447	0,14	5,46	2752	16,33	2752
12	13,11	1,056	0,455	0,41	5,17	2801	15,71	2809
14	15,39	1,109	0,462	0,65	4,91	2844	15,14	2842
16	17,67	1,156	0,467	0,82	4,72	2875	14,71	2879
18	19,95	1,199	0,472	0,99	4,54	2906	14,27	2895
20	22,23	0,657	0,377	-2,23	8,05	2321	20,86	2321
22	24,51	0,695	0,387	-1,89	7,68	2383	20,29	2386
24	26,79	0,500	0,325	-3,99	9,98	2001	23,64	2001
26	29,07	0,528	0,336	-3,62	9,57	2069	23,08	2064
28	31,35	0,556	0,345	-3,31	9,24	2124	22,61	2127
30	33,63	0,583	0,354	-3,01	8,90	2179	22,14	2183
32	35,91	0,609	0,363	-2,70	8,57	2235	21,65	2231
34	38,19	0,635	0,37	-2,47	8,31	2278	21,26	2283
36	40,47	0,660	0,378	-2,20	8,01	2327	20,81	2324
38	42,75	0,685	0,385	-1,96	7,76	2370	20,40	2364



Slika 30. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o brzini strujanja pri protocima zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1'=-15^\circ\text{C}$

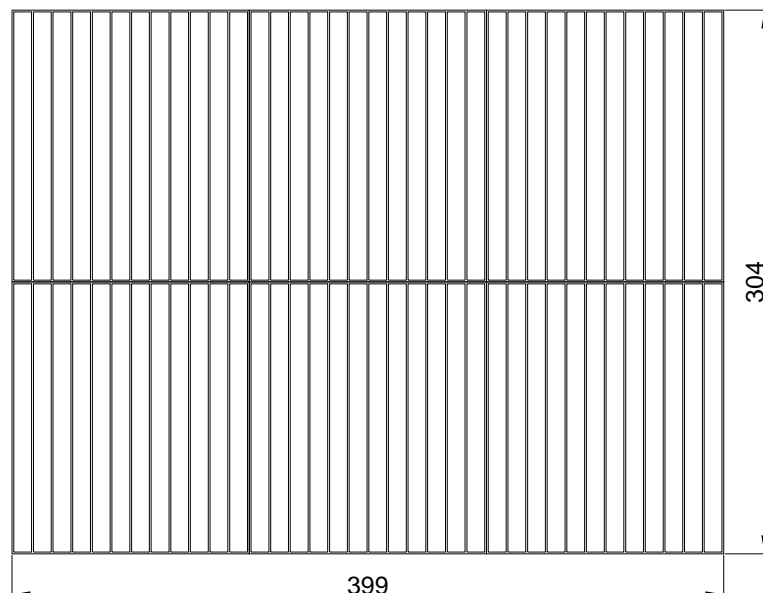


Slika 31. Ovisnost temperature ubacivanja svježeg zraka u prostoriju (θ_1'') i temperature izbacivanja otpadnog zraka (θ_2'') o brzini strujanja pri vanjskoj temperaturi $\theta_1' = -15^\circ\text{C}$

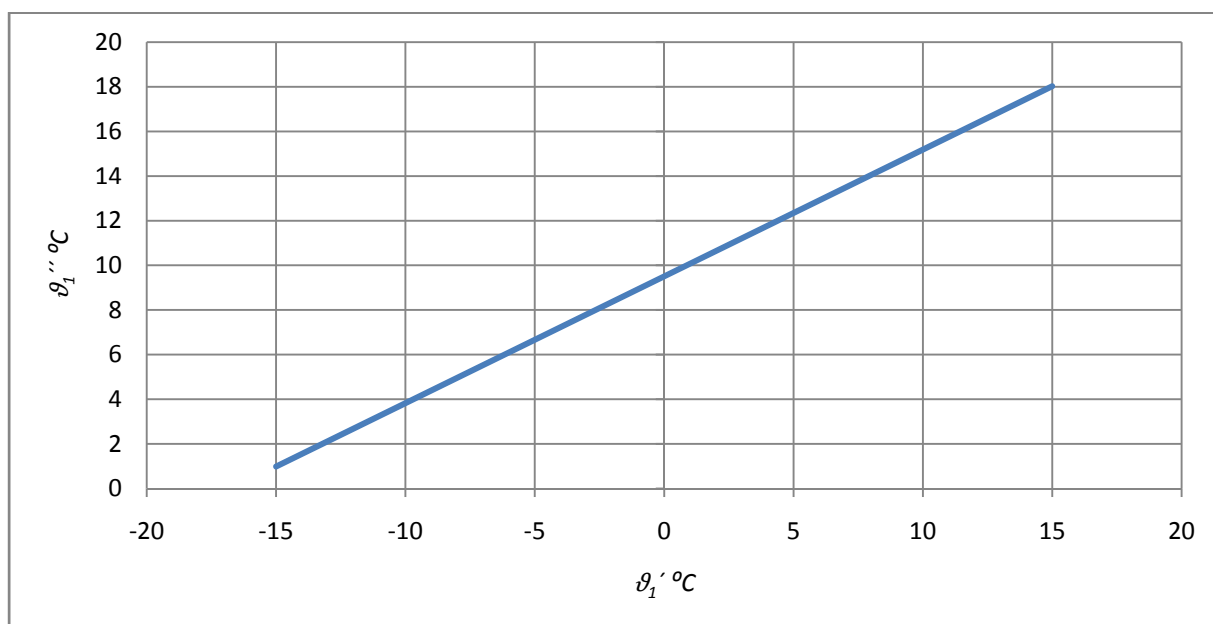


Slika 32. Ovisnost toplinskog toka Q o brzini strujanja uz protoke zraka $q_v = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ i pri vanjskoj temperaturi $\theta_1' = -15^\circ\text{C}$

Na osnovu prethodne analize odabrano je da se izmjenjivač sastoji od 18 osnovnih elemenata presjeka strujanja pri čemu je brzina strujanja zraka kroz izmjenjivač $w = 2,572 \text{ m/s}$. Naime s tim brojem osnovnih elemenata izmjenjivač ima najbolji učin.



Slika 33. Konačni poprečni presjek izmjenjivača



Slika 34. Ovisnost temperature ubacivanja o vanjskoj temperaturi za odabrani presjek pri protocima zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$

3.2 Određivanje temperature stjenke

S obzirom da je stjenka od aluminija i da je debela samo 1mm uzeto je da je temperatura stjenke po debljini konstantna što nije sasvim korektno ali nema značajnog utjecaja na rezultat.

Toplinski tok izmijenjen između struja zraka i stjenke

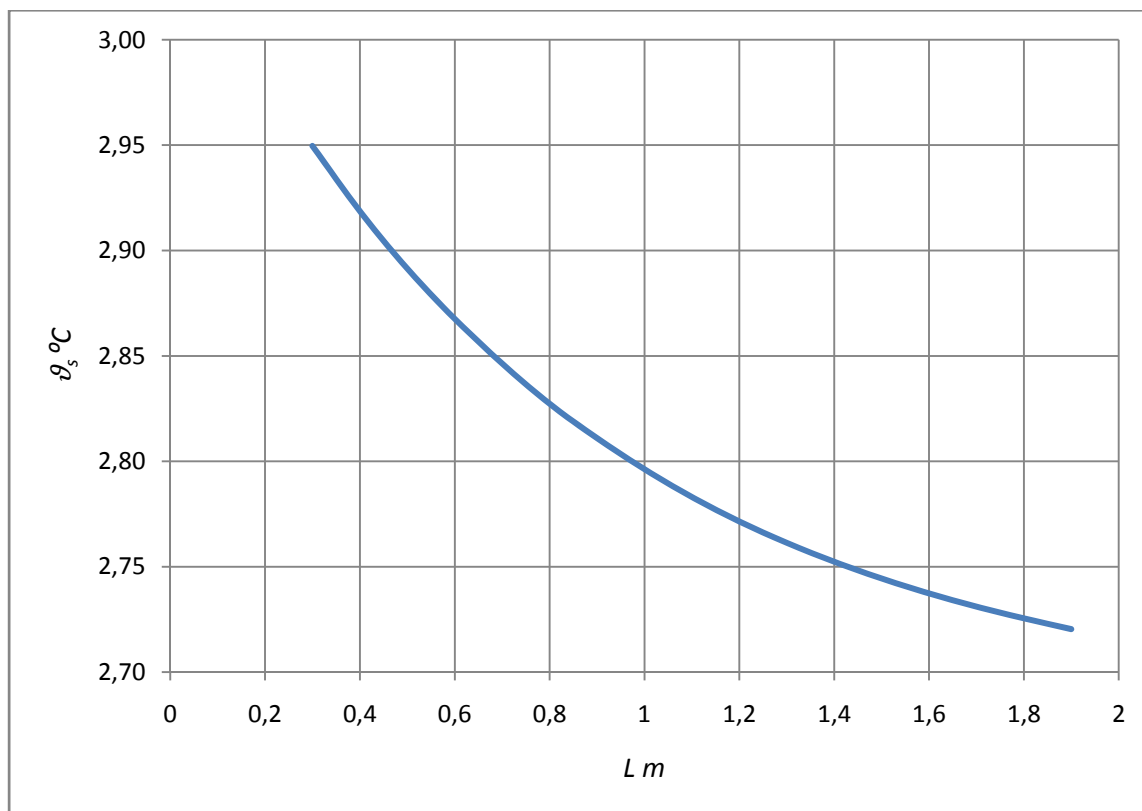
$$\dot{Q} = \alpha_1 A (\vartheta_s - \vartheta_1) = \alpha_2 A (\vartheta_2 - \vartheta_s)$$

Temperatura stjenke

$$\vartheta_s = \frac{\alpha_1 \vartheta_1 + \alpha_2 \vartheta_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

Tabela 9. Određivanje temperature stjenke pri protocima zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i uz vanjsku temperaturu $\vartheta_1'=-15\text{ }^\circ\text{C}$

L	A	π_2	π_1	ϑ_1	ϑ_2	\dot{Q}_1	$\Delta\vartheta_m$	\dot{Q}	ϑ_s
m	m ²	/	/	°C	°C	kW	°C	kW	°C
0,3	3,15	0,193	0,161	-9,55	16,04	0,991	30,94	0,991	2,950
0,4	4,2	0,257	0,203	-8,12	14,49	1,250	29,22	1,248	2,919
0,5	5,25	0,321	0,24	-6,87	13,12	1,478	27,63	1,475	2,891
0,6	6,3	0,385	0,272	-5,78	11,92	1,676	26,18	1,677	2,868
0,7	7,35	0,449	0,301	-4,80	10,86	1,853	24,82	1,856	2,846
0,8	8,4	0,513	0,327	-3,92	9,90	2,013	23,54	2,011	2,827
0,9	9,45	0,578	0,349	-3,18	9,09	2,149	22,40	2,153	2,811
1	10,5	0,642	0,369	-2,50	8,35	2,272	21,32	2,276	2,796
1,1	11,55	0,706	0,387	-1,89	7,68	2,383	20,29	2,383	2,783
1,2	12,6	0,770	0,4026	-1,36	7,10	2,479	19,35	2,479	2,772
1,3	13,65	0,834	0,4164	-0,90	6,59	2,564	18,47	2,564	2,761
1,4	14,7	0,898	0,4286	-0,48	6,14	2,639	17,66	2,640	2,752
1,5	15,75	0,963	0,4394	-0,12	5,74	2,705	16,90	2,707	2,744
1,6	16,8	1,027	0,449	0,21	5,39	2,764	16,18	2,765	2,737
1,7	17,85	1,091	0,4575	0,50	5,07	2,817	15,51	2,816	2,731
1,8	18,9	1,155	0,465	0,75	4,80	2,863	14,89	2,862	2,726
1,9	19,95	1,219	0,472	0,99	4,54	2,906	14,27	2,895	2,720



Slika 35. Temperatura stjenke po visini izmjenjivača pri protocima zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ i uz vanjsku temperaturu $\theta_1'=-15\text{ }^\circ\text{C}$

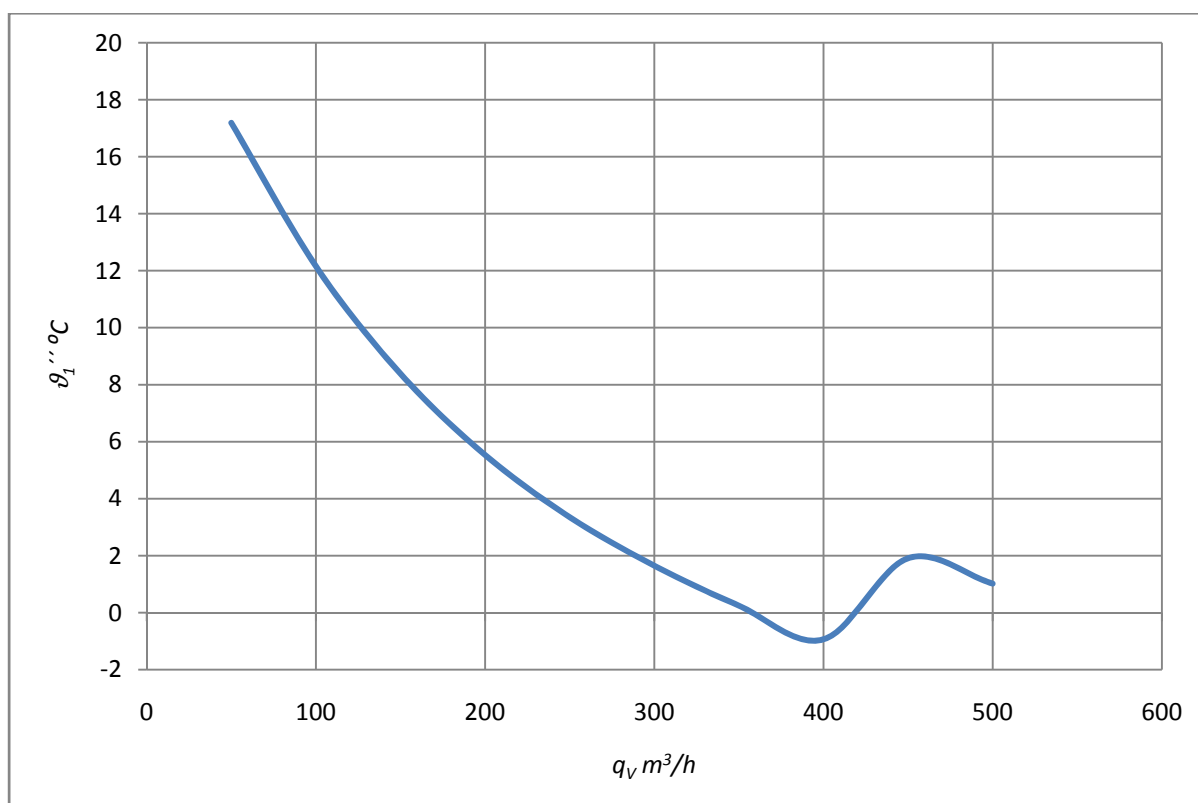
Ukoliko je vlažnost zraka u prostoriji $\varphi = 50\%$ temperatura rosišta će iznositi $\theta_r = 11\text{ }^\circ\text{C}$. To znači da će pri niskim vanjskim temperaturama, s obzirom da je temperatura stjenke u takvim uvjetima niža od temperature rosišta, u izmjenjivaču doći do kondenzacije vlage. Zbog toga je na dnu izmjenjivača potrebno ugraditi sifon koji će omogućiti odvod kondenzata. Druga je mogućnost da se smanjenjem protoka svježeg zraka povisi temperatura stjenke da bi se izbjegla kondenzacija.

3.3 Analiza promjene temperature ubacivanja smanjenjem količine svježeg zraka

Tabela 10. Određivanje promjene temperature ubacivanja s promjeni količine svježeg zraka, pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1' = -15^\circ\text{C}$

ACH	q_v	w	Re	Pe	α_1	k	π_2
h^{-1}	m^3/h	m/s	/	/	W/m^2K	W/m^2K	/
5	500	2,572	3675	2709	20,82	10,17	1,116
4,5	450	2,315	3307	2438	19,30	9,792	1,194
4	400	2,058	2940	2167	6,42	4,850	0,665
3,5	350	1,800	2572	1897	6,14	4,689	0,735
3	300	1,543	2205	1626	5,83	4,507	0,825
2,5	250	1,286	1837	1355	5,49	4,299	0,944
2	200	1,029	1470	1084	5,09	4,054	1,112
1,5	150	0,772	1102	813	4,63	3,753	1,373
1	100	0,514	735	542	4,04	3,359	1,843
0,5	50	0,257	367	271	3,21	2,762	3,032

ACH	π_3	π_1	ϑ_1''	ϑ_2''	\dot{Q}	$\Delta\vartheta_m$	\dot{Q}_m
h^{-1}	/	/	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	kW	$^\circ\text{C}$	kW
5	1,0923	0,473	1,02	4,50	2,9120	14,18	2,9160
4,5	0,9831	0,457	1,91	5,38	2,7660	14,16	2,7669
4	0,8739	0,38	-0,94	9,71	2,0444	21,16	2,0477
3,5	0,7646	0,412	0,24	10,34	1,9395	20,72	1,9381
3	0,6554	0,45	1,65	11,09	1,8158	20,17	1,8141
2,5	0,5462	0,496	3,35	11,98	1,6678	19,48	1,6712
2	0,4369	0,555	5,54	13,03	1,4930	18,48	1,4943
1,5	0,3277	0,632	8,38	14,34	1,2751	16,99	1,2724
1	0,2185	0,734	12,16	16,07	0,9872	14,72	0,9865
0,5	0,1092	0,87	17,19	18,48	0,5851	10,65	0,5868

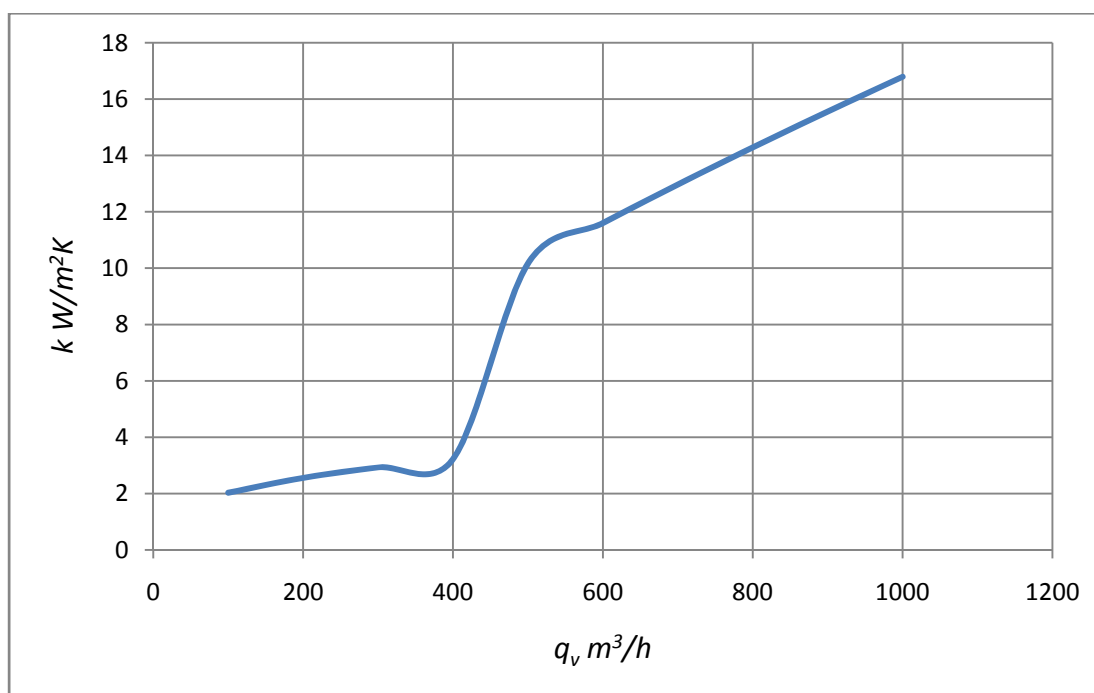


Slika 36. Ovisnost temperature ubacivanja o količini svježeg zraka pri konstantnoj količini otpadnog zraka

3.4 Analiza promjene učina s promjenom protoka zraka

Tabela 11. Izračun koeficijenta prijelaza topline i koeficijenta prolaza topline

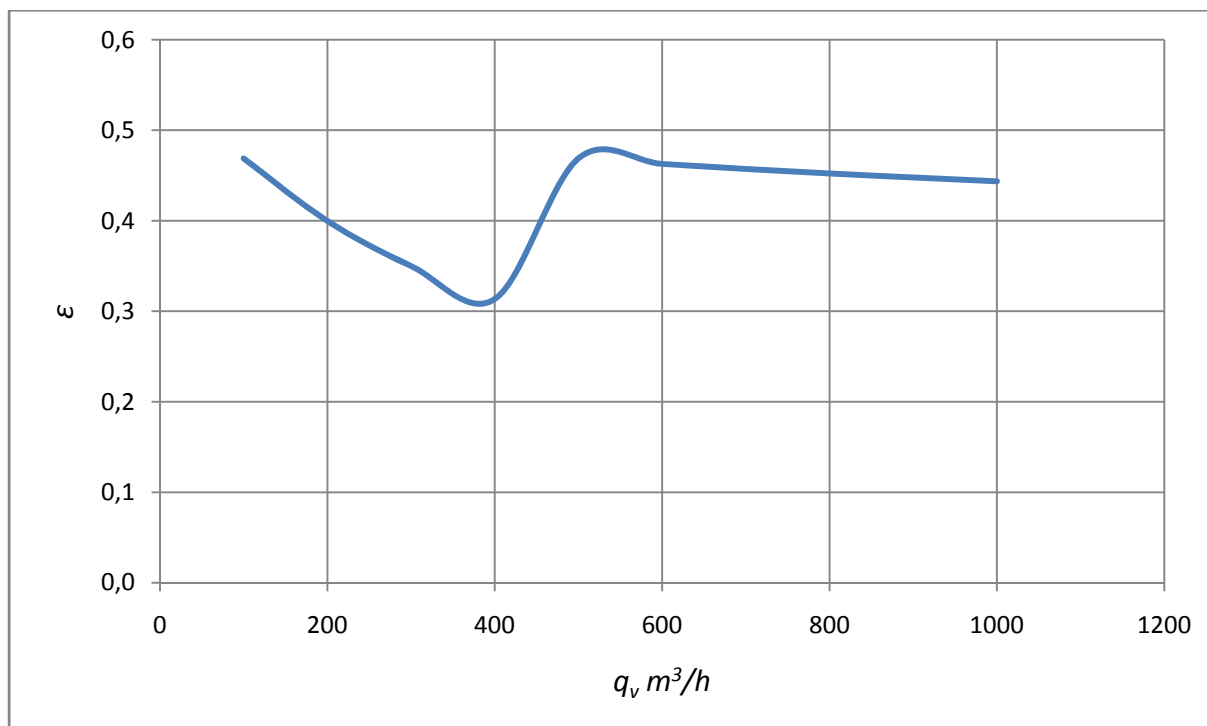
q_v	w	Re_1	Re_2	Pe_1	Pe_2	α_1	α_2	k
m^3/h	m/s	/	/	/	/	W/m^2K	W/m^2K	W/m^2K
1000	5,144	7350	6332	5419	4659	34,40	32,82	16,79
900	4,630	6615	5699	4877	4194	31,87	30,40	15,56
800	4,115	5880	5066	4335	3728	29,26	27,92	14,29
700	3,601	5145	4432	3793	3262	26,56	25,35	12,97
600	3,086	4410	3799	3251	2796	23,76	22,67	11,60
500	2,572	3675	3166	2709	2330	20,82	19,88	10,17
400	2,058	2940	2533	2167	1864	6,416	6,494	3,23
300	1,543	2205	1900	1626	1398	5,829	5,900	2,93
200	1,029	1470	1266	1084	932	5,092	5,154	2,56
100	0,514	735	633	542	466	4,042	4,091	2,03



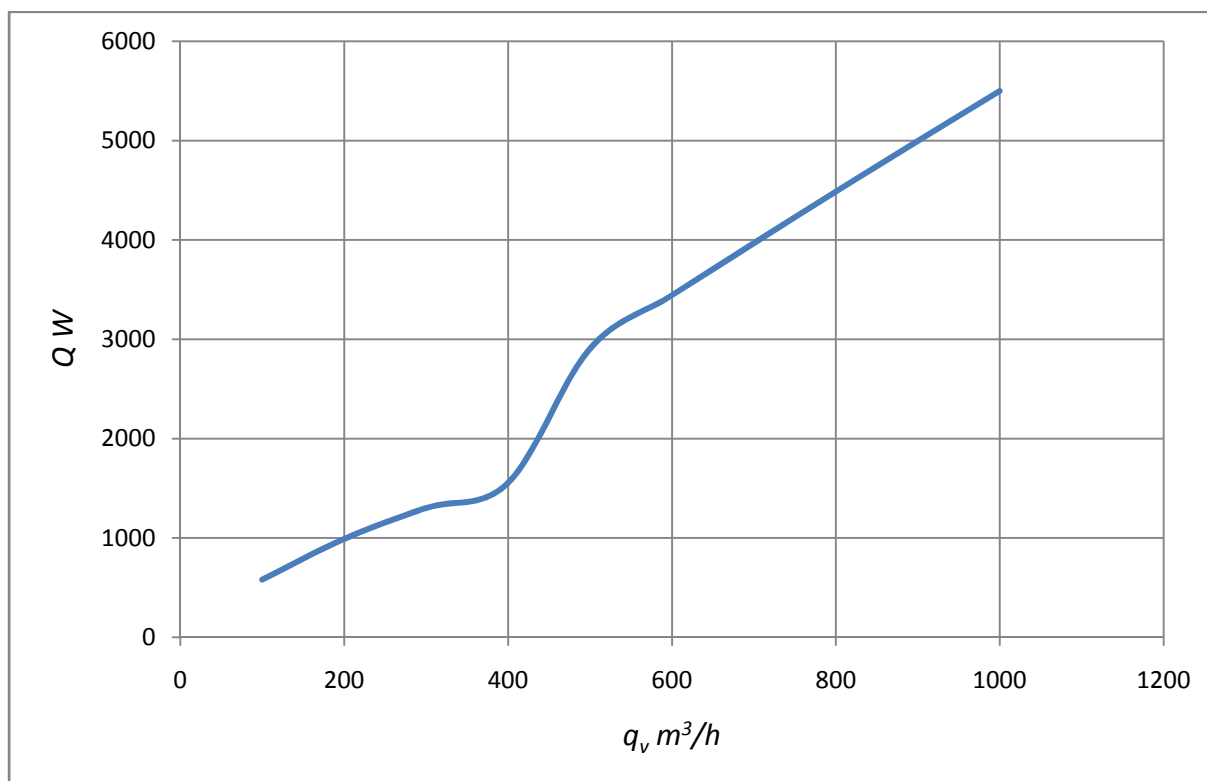
Slika 37. Ovisnost koeficijenta prolaza topline o protoku zraka

Tabela 12. Određivanje učina izmjenjivača pri različitim protocima zraka

q_v m^3/h	C_{max} W/K	C_{min} W/K	C /	NTU /	ϵ /	Q W	ϑ_1'' °C	ϑ_2'' °C
1000	362,12	335,03	0,9252	0,9999	0,4437	5499,7	0,18753	5,58468
900	325,91	301,53	0,9252	1,0293	0,4478	4996,3	0,33036	5,43031
800	289,70	268,03	0,9252	1,0633	0,4524	4486,1	0,4855	5,26262
700	253,48	234,52	0,9252	1,1032	0,4573	3968,4	0,65541	5,07898
600	217,27	201,02	0,9252	1,1513	0,4628	3442,3	0,84333	4,87587
500	181,06	167,52	0,9252	1,2110	0,4690	2906,7	1,05382	4,64836
400	144,85	134,01	0,9252	0,4804	0,3134	1554,2	-4,27	10,4025
300	108,64	100,51	0,9252	0,5820	0,3500	1301,7	-3,0176	9,04889
200	72,42	67,01	0,9252	0,7627	0,3998	991,2	-1,3142	7,20785
100	36,21	33,50	0,9252	1,2106	0,4689	581,3	1,05247	4,64982



Slika 38. Promjena efikasnosti izmjenjivača s promjenom protoka zraka



Slika 39. Promjena učina izmjenjivača usljed promjene protoka zraka pri vanjskoj temperaturi $\vartheta_1' = -15^\circ$

4. PRORAČUN PADA TLAKA

Pad tlaka na usisu otpadnog zraka (očitano iz dijagrama u katalogu proizvođača Lindab str. 141)

$$\Delta p = 60 \text{ Pa}$$

Pad tlaka pri ustujavanju u izmjenjivač (naglo suženje)

$$\Delta p = \zeta \rho \frac{w^2}{2}$$

Koeficijent gubitaka (Kraut str. 143)

$$\frac{A_2}{A_1} = 0,5 \Rightarrow \zeta = 0,9$$

Brzina strujanja

$$w = \frac{q_v}{A} = \frac{0,1389}{0,4 \cdot 0,1} = 3,473 \text{ m/s}$$

$$\Delta p = 0,9 \cdot 1,185 \cdot \frac{3,473^2}{2} = 6,43 \text{ Pa}$$

Pad tlaka uslijed skretanja struje zraka na ulazu u izmjenjivač

$$\delta = 90^\circ \Rightarrow \zeta = 1,13$$

$$\Delta p = 1,13 \cdot 1,185 \cdot \frac{2,572^2}{2} = 4,43 \text{ Pa}$$

Pad tlaka kroz izmjenjivač

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{w^2}{2}$$

Koeficijent trenja (Colebrookova formula)

$$\lambda_g = \frac{0,31}{(\log 0,143 Re)^2} = \frac{0,31}{(\log 0,143 \cdot 3166)^2} = 0,04395$$

$$\Delta p = 0,04395 \cdot \frac{1,9}{0,01875} \cdot 1,185 \cdot \frac{2,572^2}{2} = 17,46 \text{ Pa}$$

Pad tlaka pri istrujavanju iz izmjenjivača (naglo proširenje)

$$\frac{A_1}{A_2} = 0,5 \Rightarrow \zeta = 0,26$$

$$\Delta p = 0,26 \cdot 1,185 \cdot \frac{2,489^2}{2} = 0,95 \text{ Pa}$$

Pad tlaka pri skretanju struje zraka u glavi rekuperatora

$$\delta = 90^\circ \Rightarrow \zeta = 1,13$$

Brzina strujanja

$$w = \frac{q_v}{A} = \frac{0,1389}{0,399 \cdot 0,304} = 1,145 \text{ m/s}$$

$$\Delta p = 1,13 \cdot 1,185 \cdot \frac{1,145^2}{2} = 0,88 \text{ Pa}$$

Pad tlaka pri ustrujavanju zraka u ispušnu cijev (naglo suženje)

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\frac{\pi \cdot 0,16^2}{4}}{0,415 \cdot 0,17} = 0,28 \Rightarrow \zeta = 5,7$$

Brzina strujanja

$$w = \frac{q_v}{A} = \frac{0,1389}{0,415 \cdot 0,17} = 1,97 \text{ m/s}$$

$$\Delta p = 5,7 \cdot 1,185 \cdot \frac{1,97^2}{2} = 13,11 \text{ Pa}$$

Pad tlaka u ispušnoj cijevi

$$\lambda_g = \frac{0,31}{(\log 0,143 \text{ Re})^2}$$

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{wd\rho}{\eta}$$

$$w = \frac{q_v}{A} = \frac{q_v}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{0,1389}{\frac{\pi 0,16^2}{4}} = 6,91 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{6,91 \cdot 0,16 \cdot 1,185}{18,05 \cdot 10^{-6}} = 72584$$

$$\lambda_g = \frac{0,31}{(\log 0,143 \cdot 72584)^2} = 0,01922$$

$$\Delta p = 0,01922 \cdot \frac{0,37}{0,01875} \cdot 1,185 \cdot \frac{6,91^2}{2} = 10,73 \text{ Pa}$$

Pad tlaka na istrujnom otvoru otpadnog zraka

$$\Delta p = 90 \text{ Pa}$$

Ukupni pad tlaka

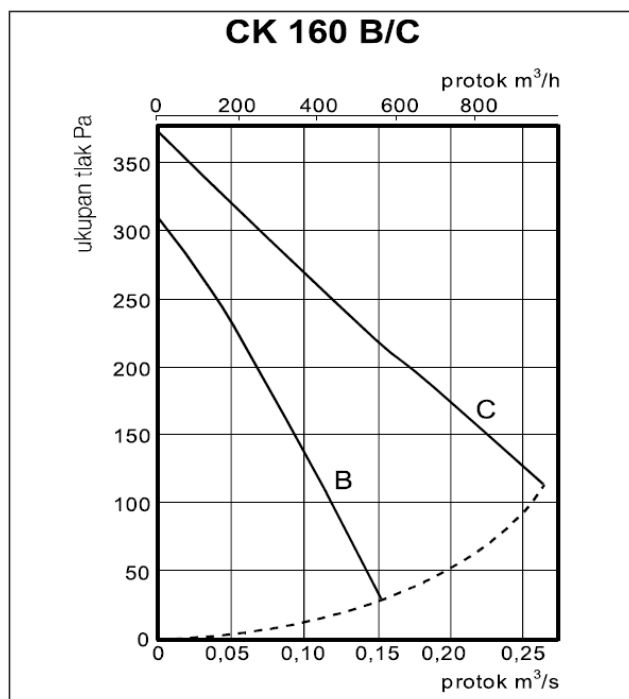
$$\Delta p = 70 + 6,43 + 4,43 + 17,46 + 0,95 + 0,88 + 13,11 + 10,73 + 90 = 213,99 \text{ Pa}$$

Da bi osigurali protoka zraka od $q_v = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ na osnovu prethodno izračunatog pada tlaka odabran je centrifugalni ventilator s okruglim priključkom tipa:

CBUV 160 C



Slika 40. Odabrani ventilator

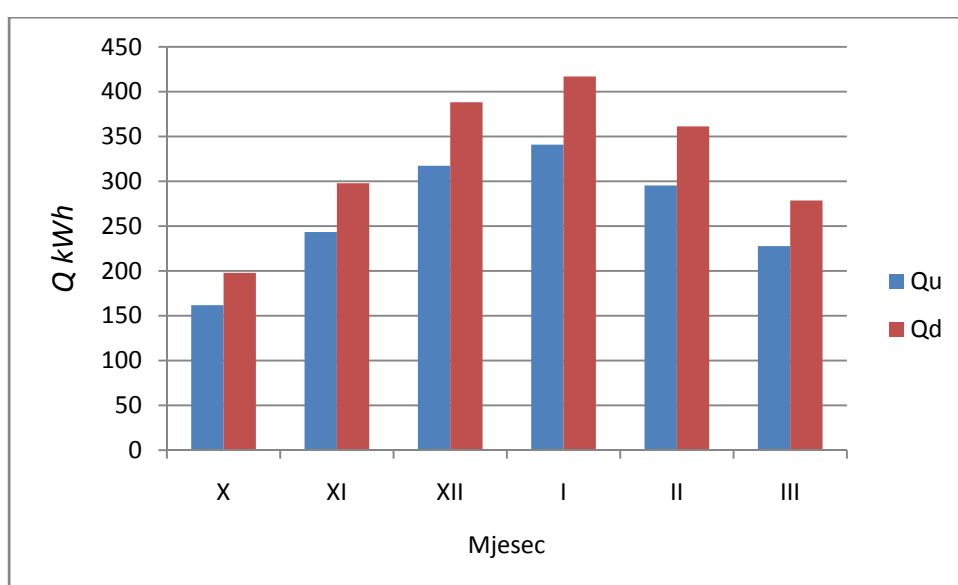


Slika 41. Karakteristika odabranog ventilatora

5. Ušteda energije i potrošnja dodatne energije za dogrijavanje i ventilator

Tabela 13. Toplina vraćena iz otpadnog zraka i toplina potrebna za dogrijavanje svježeg zraka na sobnu temperaturu

Mjesec		X	XI	XII	I	II	III	Σ
Srednja temperatura	$\vartheta_1', ^\circ\text{C}$	11,7	6,5	1,8	0,3	3,2	7,5	
Temperatura ubacivanja	$\vartheta_1'', ^\circ\text{C}$	16,15	13,20	10,53	9,68	11,32	13,77	
Ušteđena energija	Q_u, kWh	161,79	243,47	317,29	340,85	295,30	227,76	1586,46
Energija za dogrijavanje	Q_d, kWh	197,91	297,83	388,14	416,97	361,24	278,62	1940,72



Slika 42. Ušteđena toplinska energija Q_u i toplinska energija potrebna za dogrijavanje svježeg zraka na sobnu temperaturu Q_d pri protoku zraka $q_v=500\text{m}^3/\text{h}$ izračunata preko srednji mjesečni temperatura

Ušteđena toplinska energija

$$Q_u = q_v \rho c_p (\vartheta_1'' - \vartheta_1') m f$$

Broj dana u mjesecu kada je rekuperator u pogonu

$$m = 20$$

Trajanje pogona dnevno

$$f = 10h$$

Energija potrebna za dogrijavanje svježeg zraka na sobnu temperaturu

$$Q_d = q_v \rho c_p (\vartheta'_2 - \vartheta''_1) m f$$

Električna energija potrošena na ventilatorima mjesečno

$$W_m = 2 P m f = 2 \cdot 100 \cdot 20 \cdot 10 = 20000 \text{ Wh} = 20 \text{ kWh}$$

Električna energija potrošena na ventilatoru u sezoni grijanja

$$W = 6 W_m = 120 \text{ kWh}$$

Snaga ventilatora

$$P = 100 \text{ W}$$

Jedinična cijena toplinske energije

$$P_T = 0,23 \text{ kn/kWh}$$

Jedinična cijena električne energije

$$P_E = 0,52 \text{ kn/kWh}$$

Ukupna ušteda u sezoni grijanja

$$U = Q_u P_T - W P_E = 1586,46 \cdot 0,23 - 120 \cdot 0,52 = 364,9 - 62,4 = 302,5 \text{ kn}$$

Procijenjena cijena rekuperatora

$$C = 1500 \text{ kn}$$

Vrijeme otplate investicije

$$T = \frac{C}{U} = \frac{1500}{302,5} = 4,96$$

Dakle potrebno vrijeme povrata investicije je pet sezona grijanja.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je konstruirati izmjenjivač topline zrak/zrak od ekstrudiranih aluminijskih profila za potrebe rekuperacije topline iz otpadnog zraka zagrijavanih uredskih prostora.

Prilikom izrade rada provedena je analiza više različitih presjeka strujanja da bi se došlo do optimalne konstrukcije. Za tako dobivenu konstrukciju izmjenjivača provedene su različite analize da bi se odredile karakteristike izmjenjivača.

Analizirana je temperatura stijenke pri niskim vanjskim temperaturama da bi se vidjelo dali će doći do kondenzacije vlage iz otpadnog zraka. S obzirom da je ustanovljeno da će do kondenzacije dolaziti u izmjenjivač bi trebalo ugraditi sifon za odvod kondenzata.

Provedena je i analiza učina izmjenjivača pri različitim protocima zraka da bi se vidjele karakteristike izmjenjivača pri radu u uvjetima različitim od onih za koje je konstruiran.

Pri niskim vanjskim temperaturama temperatura svježeg zraka na izlazu iz izmjenjivača je preniska za direktno ubacivanje u prostoriju te bi izmjenjivač trebalo opremiti i grijačem za dogrijavanje zraka ili barem ubacivanje vršiti preko radijatora.

Zamisao je bila da ovo bude uspravni izmjenjivač koji bi se jednostavno montirao na vanjski zid u samoj prostoriji. Zbog toga je zaključeno da izmjenjivač morao biti istosmjerni čime mu je dosta ograničen stupanj povrata topline te on iznosi za nazivne protoke zraka ($q_v=500\text{m}^3/\text{h}$) 46%. To baš i nije impresivno kad se zna da u mnogim modernim sustavima povrata topline on iznosi i do 90%. Međutim ti sustavi se uobičajeno prave za veće protoke zraka, tj. za veće objekte koji imaju centralnu pripremu zraka i razvodni sustav do pojedinih prostorija. Osim toga dobra je stvar kod ovog izmjenjivača što bi mu cijena bila relativno niska, a ugradnja i održavanje dosta jednostavni.

Ušteda korištenjem ovoga rekuperatora po sezoni grijanja iznosi oko 300kn, što znači da je za povrat investicije, uz procijenjenu cijenu uređaja od 1500kn, potrebno pet godina.

S obzirom na sve navedeno čini mi se da bi ovakav proizvod imao svoje tržište ali da ipak ne bi polučio osobito dobar rezultat.

Popis literature

- /1/ *Bojan Kraut* Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
- /2/ *Reknagel, Špenger, Šramek, Čeperković* Grejanje i klimatizacija, Interklima, Vranjička Banja, 2004
- /3/ *Antun Galović* Termodinamika II, Zagreb, 2003.
- /4/ Boris Halasz Predlošci za vježbe iz termodinamike II, Zagreb, 2001.
- /5/ *Katalog proizvoda, Lindab: Comfort 2008*